

4D多項目モニタリングを目指して：精密制御定常信号を用いた地下貯留層の周波数依存性の評価

著者	船戸 遥子
学位名	修士（海洋科学）
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2017
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001568/

修士学位論文

4D 多項目モニタリングを目指して
～精密制御定常信号を用いた地下貯留層の
周波数依存性の評価～

平成 29 年度

(2018 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海洋管理政策学専攻

船戸 遥子

目次

1. はじめに	1
1.1 研究背景	1
1.2 本研究の目的	3
1.3 本論文の構成	3
2. 本論	4
2.1 アクロスの原理	4
2.2 アクロスを用いたモニタリング実証実験	5
2.3 解析方法	11
2.3.1 観測データから伝達関数を求める	13
2.3.2 震源特性の補正	13
2.3.3 伝達関数	14
2.3.4 周波数ごとの振幅の時間変化の推定	16
2.4 解析結果	17
2.4.1 走時の遅れ	17
2.4.2 周波数ごとの振幅の時間変化	19
3. 検討・考察	22
3.1 気象データや潮汐の時間変化との相関関係	22
3.1.1 気温，気圧，湿度および潮汐との相関関係	22
3.1.2 降雨と伝達関数の振幅変化	24
3.2 振幅の変化様式の分類	28
3.2.1 振幅変化の分類	28
3.2.2 振幅変化と地下構造モデルの関係	31
3.3 不均質のスケールと分布の推定	34
3.3.1 不均質のスケールの推定	34
3.3.2 不均質の分布の推定	38
4. 結論	45

参考文献

付録

1. はじめに

1.1 研究背景

現在、世界規模の環境問題として対策が急がれるものに地球温暖化がある。2015年に開催された国連気候変動枠組条約第21回締約会議（COP21）ではパリ協定が採択され、世界全体の平均気温の上昇を産業革命以前に比べ2℃以下に抑えるため、温暖化対策をすべての国で強化していくことを明確にした¹⁾。2018年には、パリ協定の実施指針の採択に向けてCOP24が開催される予定である。また、日本は、2013年度比で2030年度までに温室効果ガスの排出を26%削減するという目標を提出し²⁾、国内でも温暖化対策に向けた技術開発などが急がれる。

そこで、注目されているのが、温暖化の主な原因である二酸化炭素を地中に貯留する二酸化炭素地中貯留（CCS, Carbon dioxide Capture and Storage）と呼ばれる技術である。図1に示すように、CCSとは、火力発電所などの二酸化炭素の大規模な発生源から二酸化炭素を分離、回収し、パイプラインで地中へと輸送して貯留する技術である³⁾。貯留層には、上部にキャップロック層という流体を通しにくい層がある場所が選ばれるが、社会的な賛同を得るためには、貯留層から二酸化炭素が漏洩していないという事実をデータで示さなければならない。そのためには、地下空間における物理的变化や物性分布のモニタリングが必要である。

世界では、すでに、CCS実用化に向けた動きが盛んであり、ノルウェーやカナダ、アメリカなどで大規模なプロジェクトが行われている。日本でも、現在、北海道苫小牧市において大規模実証試験が行われている。また、2003年から2005年に、新潟県長岡市において国内で初めてのCCS実証試験が実施され、地中の二酸化炭素の挙動を確認するために、二酸化炭素注入井の周囲の観測井において、物理検層や坑井間弾性波トモグラフィなどが行われた。その結果、二酸化炭素は、キャップロック層により貯留層にとどまっていることが分かった。しかし、この長岡プロジェクトでは、地中のモニタリングは鉛直方向の観測アレイの配置が主であり、物理検層の観測間隔は約1回/月と断続的なものであった⁴⁾。しかし、地下空間における物理変化は3次元的事実であることは自明である。したがって、次の段階として、水平方向も含めた空間的な広がりを連続的に捉えるようなモニタリングが必要となってくる。また、地下空間における時間変化のスケールは明確でないため、可能なかぎり連続的にモニタリングできる手法が望ましい。

2011年に兵庫県淡路島においてCCSモニタリングを目標とした、空気注入による地下貯留層変化のモニタリング実証試験が行われた⁵⁾⁶⁾。これは、空気注入井の周囲に面的に地震計を配置し、アクロス（後述）から連続的に地震波を送信することで、空気注入による影響を連続的に、そして、水平方向の広がりを捉えることを目的にしている。この観

測からは、笠原ほか（2011）、鶴我ほか（2011）により、空気注入に伴う波形残差の時間変化が、また、本城ほか（2015）により振幅の変化には周波数依存性があることがすでにわかっている。

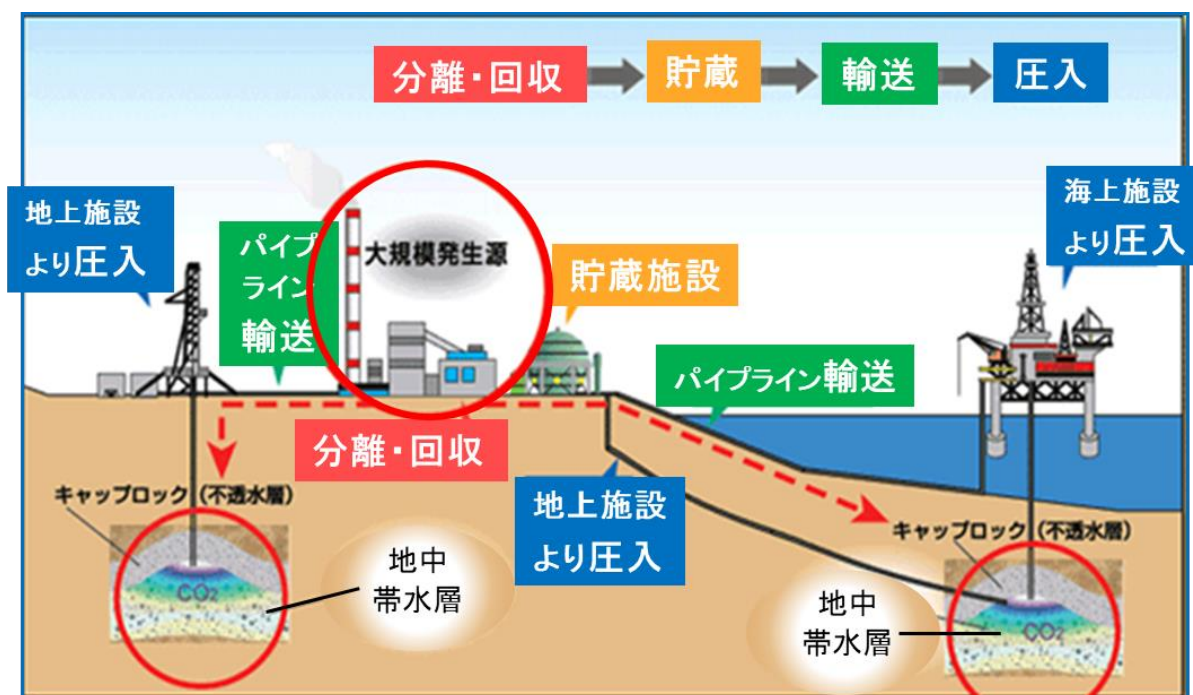


図1 CCSのイメージ (RITE ホームページに加筆)

CCSは、二酸化炭素の大規模発生源から二酸化炭素を分離・回収し、貯蔵施設で貯蔵する。その後、パイプラインで地上や海上の圧入施設へ輸送し、地中の帯水層へ二酸化炭素を圧入し、貯留する。

1.2 研究の目的

本研究は、地下における 3 次元空間の物理状態の時間変化を様々な項目において同時にモニタリングする 4 次元 (4D) 多項目モニタリング手法の確立を目指すものである。その一環として、本研究では、精密制御定常信号システム (アクロス:ACROSS, Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) を用いた地震波観測データの解析から、地下貯留層とその周辺域の物理状態の変化を検出し、その周波数依存性の評価をおこなう。アクロスとアクロスを用いた実証実験については第 2 章で述べる。

1.3 本論文の構成

本論文の第 2 章以降の構成は次のとおりである。まず、第 2 章では、アクロスの原理と実際にアクロスを用いた実証実験を紹介する。そして、その観測から得られたデータの解析方法と解析結果を述べる。さらに、第 3 章で検討・考察、第 4 章で結論を述べる。

2. 本論

2.1 アクロスの原理

アカロスとは、人工震源から位相と周波数を精密に制御した弾性波や電磁波を地下に連続的に照射し、その応答を地震計で計測することで地下の構造や状態を監視・観測する技術である⁸⁾。地下の物性の変化を地震波の伝達関数の時間変化として求めることができる。図2に示すように、震源の発震力を F 、地震計の観測値を U とし、地下構造を線形力学系であると仮定すると、地震波の伝達関数 H との関係は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} & H_{xz} \\ H_{yx} & H_{yy} & H_{yz} \\ H_{zx} & H_{zy} & H_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}$$

伝達関数 H は上式のように 9 つの要素を持つ 2 階のテンソルという形で表される。この伝達関数の各成分の時間変化を調べることによって、地下の構造や状態の変化を捉えることができる。

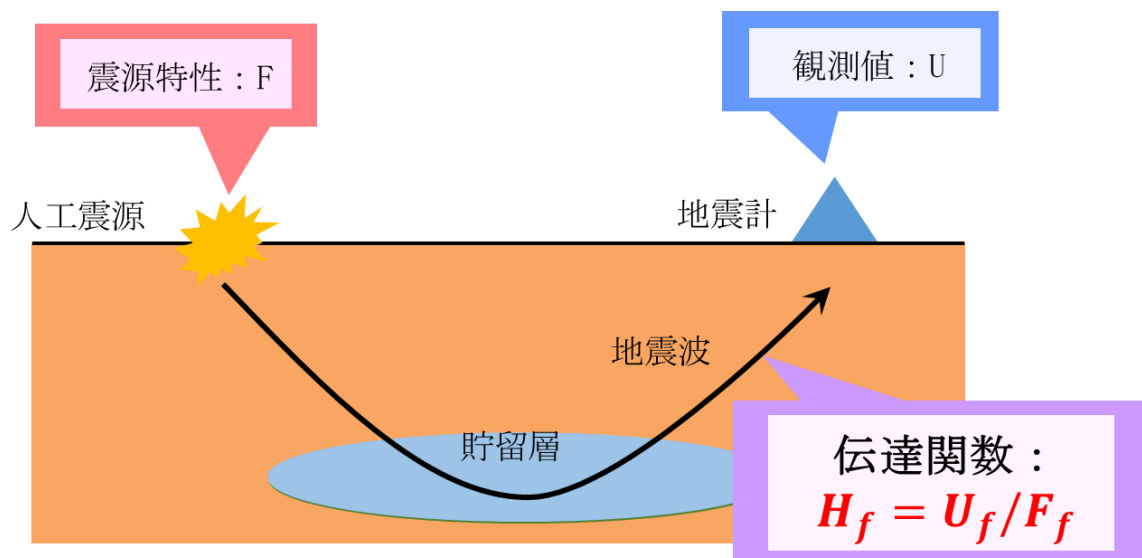


図2 アクロスの原理

地下構造が線形力学系であると仮定したとき、地震波の伝達関数 H は、震源特性 F と観測地 U のデコンボリューションによって求められる。

2.2 アクロスを用いたモニタリング実証実験

2011年2月11日から3月10日にかけて、兵庫県淡路島野島断層周辺においてアクロスを用いた観測が行われた。これは、CCSモニタリングを目標とした、空気注入による地下貯留層変化のモニタリング実証実験である⁵⁾⁶⁾。地下へ空気を注入し、アクロス震源から地震波を送信、空気注入点周辺に設置された地震計で応答を計測した。図3および、図4は空気注入点、震源、観測点の配置を表している。また、表1に観測点の緯度や経度の情報を示す。

図5に示すように、空気の本注入は、2011年2月26日から2011年3月2日の5日間に行われ、合計約80トンが注入された。2月26日は9.0トン、2月27日～3月2日は15.9トン、3月3日は7.0トンが、注入圧力21気圧、注入深度約100mの大阪層群に注入された。深度100mには元々水みちがあったとされている。また、本注入前の2月24日、2月25日には、それぞれ1.4トン、0.2トンの少量の空気が試験的に注入された。

使用されたアクロス震源は、名古屋大学が所有する縦置き回転型の弾性波送信震源である。震源は、図6に示すような構造で、偏心荷重をモーター軸回りに回転させることで、遠心力が発生し、その反力によって変位が生じ、地震波が出射される⁹⁾。遠心力を f 、荷重を M 、偏心荷重の質点と軸との距離を r 、モーターの角速度を ω 、変位を u とすると以下のような式になる。

$$f = Mr\omega^2 \propto u$$

送信は、スイープ周期（反復周期）100秒で、10Hz～30Hzの周波数帯域において水平面内での加振をおこなった。偏心荷重の回転方向は、1時間ごとに正転（時計回り）と逆転（反時計回り）を反転させた。スイープは1時間（3600秒間）に32回繰り返す。最後の400秒間は回転を反転させるための準備期間とした。そのため、正転、逆転それぞれ1時間分（計2時間分）の回転で得られた記録を合成することで、送信する地震波は任意方向の単振動として扱えるようになっている。

観測は、空気注入点周辺の32地点に設置した3成分地震計で行った（図3）。各観測点に設置された地震計や用いたデータロガーは表1に示すとおりである。サンプリング周波数は200Hzである。観測データは、1時間ごとに400秒×8区間のデータをスタッキングする。つまり、ある1時間のデータは、スタッキングされた400秒間のデータとなる。

鶴我ほか（2011）によると、空気注入に伴う地震波形記録の振幅および位相に時間変化が生じることが指摘され、また、本城ほか（2015）では、それら時間変化には周波数依存性がある可能性が示唆された。



図3 空気注入点，震源，観測点の配置

図中の○印は空気注入点，△印は地震計（数字は観測点番号），☆印は人工震源の位置をそれぞれ示す。

実証試験は，兵庫県淡路島野島断層周辺において行われた．空気注入点の周囲に32点の地震計を設置している．

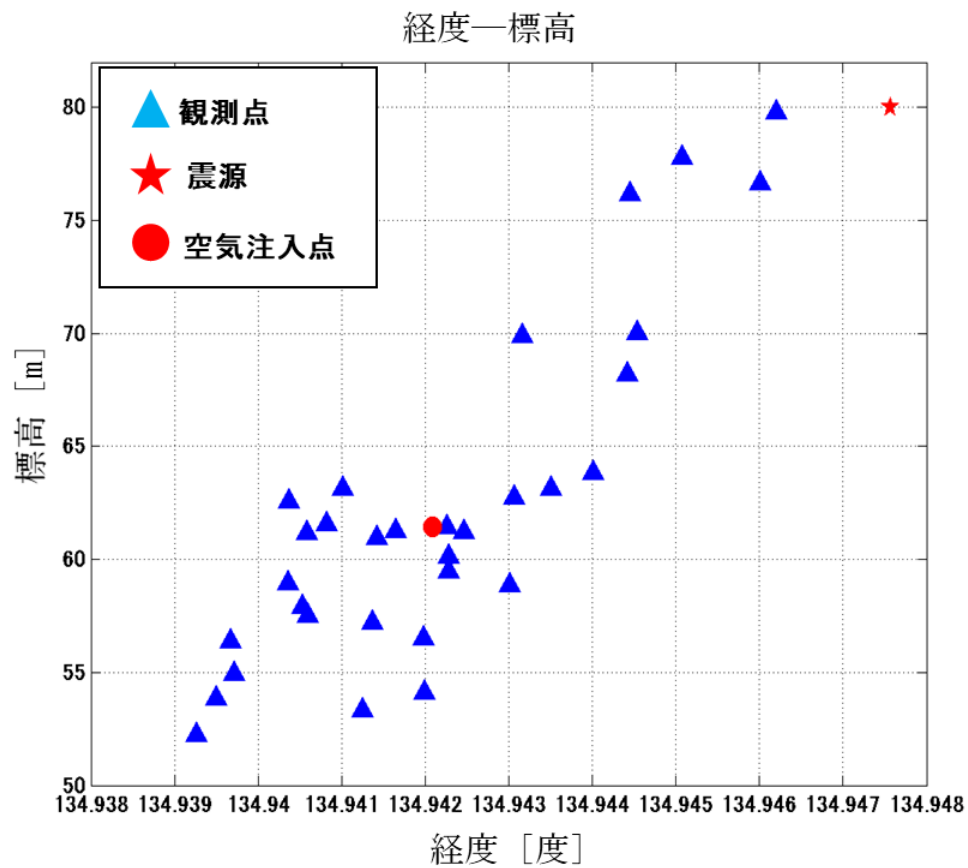


図 4 空気注入点，震源，観測点の標高
 横軸は経度 [度]，縦軸は標高 [m]を表す．図中の○印は空気注入点，△印は地震計，☆印は人工震源の位置をそれぞれ示す．標高は，東に行くほど高くなっている．

表 1. 観測点情報

各観測点の緯度、経度、標高、設置した地震計の型番、その固有振動数と感度、用いたデータロガーの型番を表に示す。

観測点番号	緯度	経度	標高	地震計型番	固有振動数 (Hz)	感度 (V/kine)	データロガー型番
st1	34.55043111	134.9462056	79.79	Sercel L-28	4	0.1	KGC HKS-9550
st2	34.55101083	134.9460081	76.64	Sercel L-28	4	0.1	KGC HKS-9550
st3	34.55143028	134.9450775	77.81	Sercel L-28	4	0.1	KGC HKS-9550
st4	34.55143694	134.9444506	76.20	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st5	34.55072111	134.9445367	70.05	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st6	34.55014806	134.9444219	68.18	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st7	34.54937889	134.9440136	63.86	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st8	34.55082056	134.9435000	63.14	KINKEI KVS-300	2	0.8	KINKEI EDR-X7000
st9	34.55086250	134.9430153	58.88	KINKEI KVS-300	2	0.8	KINKEI EDR-X7000
st10	34.55049389	134.9431561	69.92	KINKEI KVS-300	2	0.8	KINKEI EDR-X7000
st11	34.54958417	134.9430608	62.75	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st12	34.54895500	134.9424647	61.24	CGIF CDJ-S2C-2	2	2.0	KGC HKS-9550
st13	34.54978361	134.9422856	59.50	CGIF CDJ-S2C-2	2	2.0	KGC HKS-9550
st14	34.55053083	134.9422631	61.44	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st15	34.55112778	134.9422767	60.13	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st16	34.55152806	134.9419931	54.13	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st17	34.55284667	134.9419747	56.50	CGIF CDJ-S2C-2	2	2.0	KGC HKS-9550
st18	34.55238361	134.9413631	57.23	CGIF CDJ-S2C-2	2	2.0	KGC HKS-9550
st19	34.55154361	134.9412497	53.33	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st20	34.55089556	134.9414186	60.95	KINKEI KVS-300	2	0.8	KINKEI EDR-X7000
st21	34.54962389	134.9416481	61.27	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st22	34.54868722	134.9410092	63.16	CGIF CDJ-S2C-2	2	2.0	KGC HKS-9550
st23	34.54961528	134.9408150	61.56	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st24	34.55027722	134.9405786	61.18	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st25	34.55097250	134.9403542	58.94	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st26	34.55148083	134.9405281	57.90	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st27	34.55206028	134.9405933	57.53	CGIF CDJ-S2C-2	2	2.0	KGC HKS-9550
st28	34.55296806	134.9403672	62.56	Lennartz LE-3DLiteMk II	1	4.0	KGC HKS-9550
st29	34.55077278	134.9396653	56.37	CGIF CDJ-S2C-2	2	2.0	KGC HKS-9550
st30	34.55160056	134.9395014	53.85	CGIF CDJ-S2C-2	2	2.0	KGC HKS-9550
st31	34.54992889	134.9397153	54.96	KINKEI KVS-300	2	0.8	KINKEI EDR-X7000
st32	34.54948111	134.9392611	52.26	KINKEI KVS-300	2	0.8	KINKEI EDR-X7000

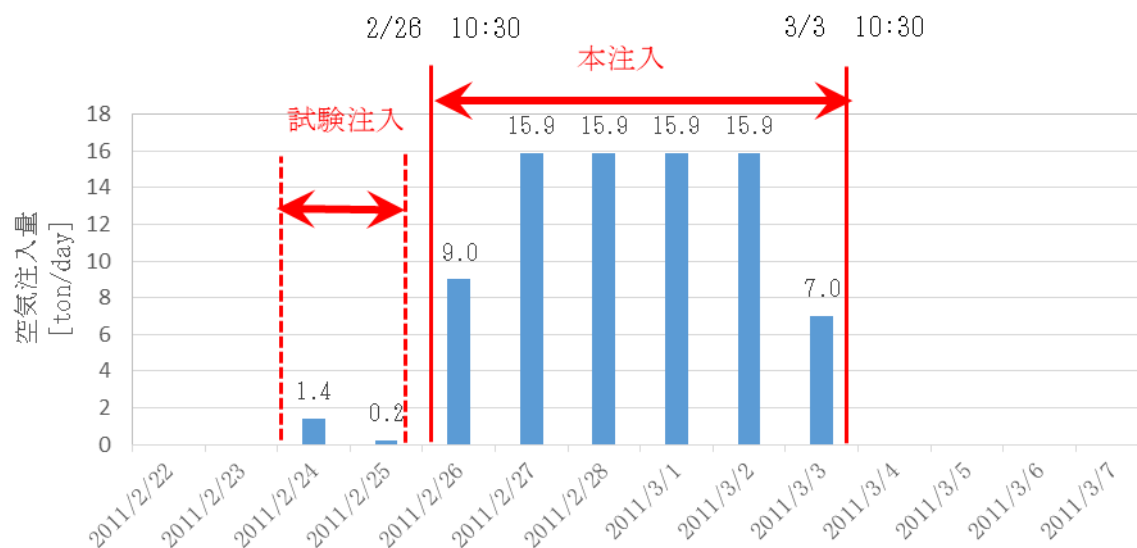


図5 地下への空気注入実験

地下への空気注入は、2011年2月24日13:45～2011年3月3日10:30まで行われた。2月24日、2月25日は試験注入が行われ、それぞれ1.4トン、0.2トンの空気が21気圧で注入された。2月26日10:30～3月3日10:30は本注入が行われた。2月26日は9.0トン、2月27日～3月2日は15.9トン、3月3日は7.0トンが21気圧で注入された。

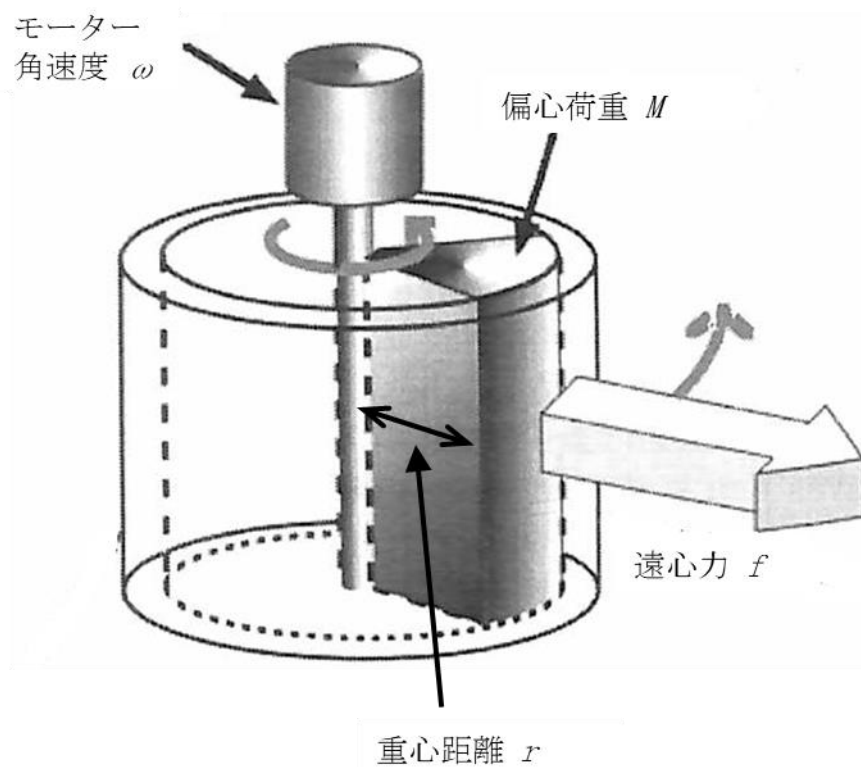


図6 弾性波アクロス震源の模式図 (Yamaoka *et al.* (2001)に加筆)
 偏心荷重をモーター軸回りに回転させることで、遠心力 f が発生する。
 その反力によって変位が生じ、地震波が出射される。

$$f = Mr\omega^2 \propto u$$

2.3 解析方法

本節では、伝達関数を求めるための解析方法を述べる。図 7 は、伝達関数を求めるための解析のフローチャートである。観測データ、震源特性、伝達関数のそれぞれの解析方法は本城ほか（2015）に準じる。

地震計で得られた観測データは、最終的に、フーリエ変換や正転と逆転の合成を行った変位（[m]）データとなる。また、震源のデータは、正転と逆転の合成や剛体運動近似を行った力（[N]）のデータとなる。それらのデータの座標軸を統一し、デコンボリューションすることで伝達関数を求める。そして、伝達関数の走時に遅れがみられた観測点に着目する。伝達関数の解析では、まず、周波数ごとの振幅の時間変化を調べ、空気注入後に振幅が変化した周波数を特定する。続いて、振幅変化と気象との相関関係を調べ、空気注入の影響が顕著であり、かつ、気象の影響が小さい振幅変化を特定する。そのような振幅の変化様式を 3 つに分類し、各様式の振幅変化から地下構造のイメージを推測する。最後に、同様の周波数帯域における、同様の振幅の時間変化から不均質のスケールと分布を推定する。

解析の対象期間は、2011 年 2 月 22 日 0 時から 2011 年 3 月 7 日 23 時（計 336 時間）とした。

以下に解析の流れにそって、それぞれを説明する。

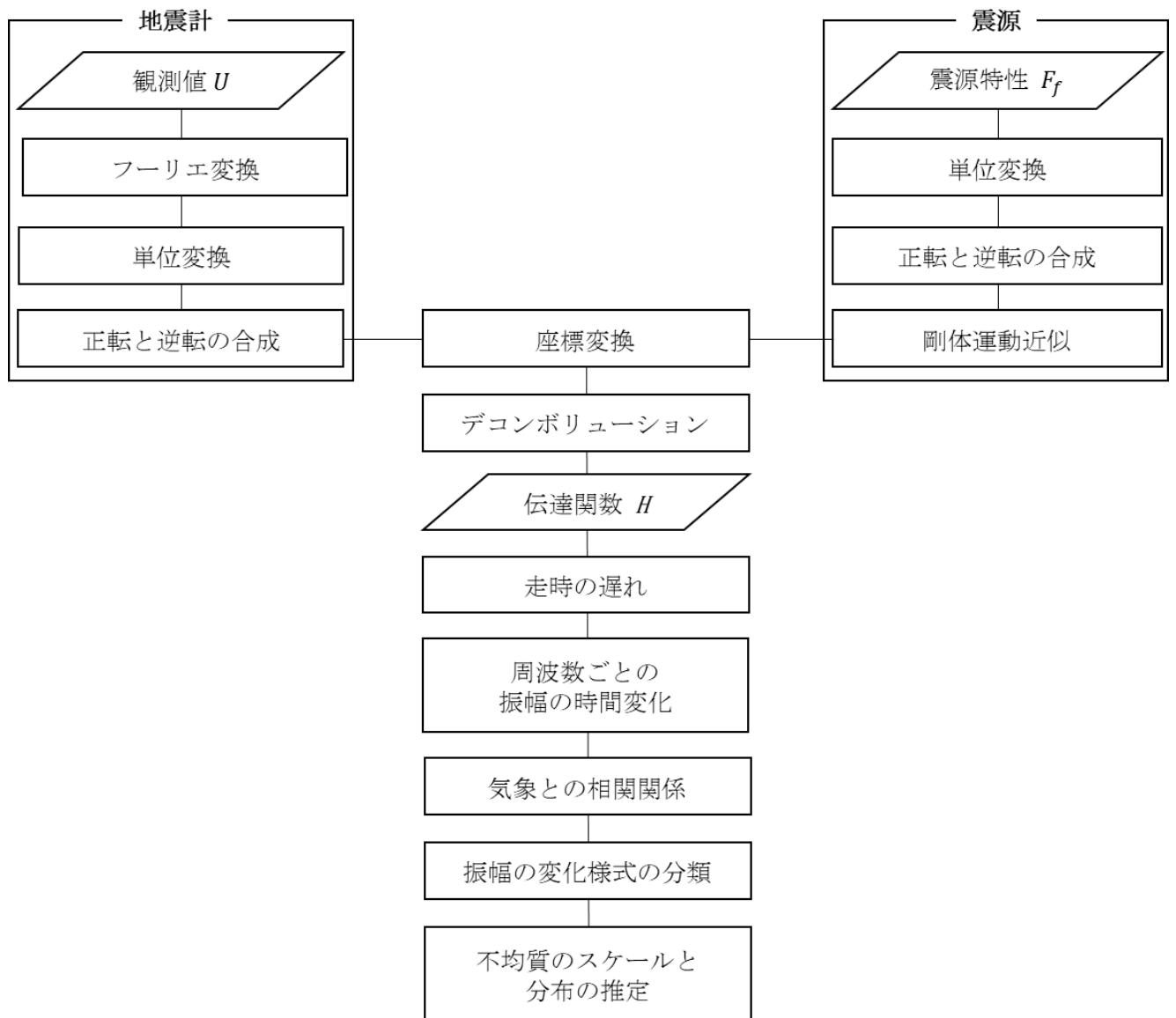


図 7 解析の流れ

地震計で得られた観測データは、最終的に変位([m])のデータへと変換する。震源のデータは、最終的に力([N])のデータへと変換する。それらのデータの座標軸を統一し、デコンボリューションすることで伝達関数を求める。そして、伝達関数の走時に遅れがみられた観測点において、周波数ごとの振幅の時間変化を調べ、空気注入後に振幅が変化した周波数を特定する。続いて、振幅変化と気象との相関関係を調べる。気象の影響が小さい振幅の変化様式を3つに分類し、各様式の振幅変化から地下構造のイメージを推測する。同様の周波数帯域における、同様の振幅の時間変化から不均質のスケールと分布を推定する。

2.3.1 観測データから伝達関数を求める

アクロスの観測データは、まず、得られたデータをスタッキングすることで、信号とノイズの比である S/N 比を向上させる。1 時間を 400 秒×9 に区切り、最後の 400 秒間は反転のための準備期間とし、その前の 400 秒×8 区間においてスタッキングを行う。本研究では、既に、スタッキングされたデータを用いた。

次に、時間領域のデータに対し、以下の式でフーリエ変換を行い、周波数領域へと変換した。

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega^{(j-1)(k-1)}$$

続いて、単位変換を行う。地震計で得られたデジタル値(D)を電圧値($V[V]$)、速度値($v[m/s]$)へと変換し、最終的に変位値($U[m]$)へと変換した。各物理量への変換の式は以下のとおりである。

$$V = D \cdot r \quad (r: \text{量子化単位})$$

$$v = V/g$$

$$U = v/(2\pi f)$$

最後に、正転と逆転の合成を行った。震源の回転は 1 時間ごとに反転させているため、連続する 2 時間分の正転と逆転のデータを加算、減算することで、互いに直交した任意の方向の 1 時間分の単振動データとして扱えるようになる。

2.3.2 震源特性の補正

震源特性とは、震源の振動特性のことである。実際の震源の振動は、観測地域の地盤の影響のため計算による理論値とは異なる。そこで、震源の振動をモデリングすることで震源特性を求める必要がある（本城ほか、2015）。

震源の解析では、本城ほか（2015）により震源近傍に設置された地震計のデータから推定した震源特性を用いた。震源特性は、周波数領域において各信号周波数について推定した。本城ほか（2015）に従う震源特性の推定方法は次のようである。

まず、単位変換を行った。用いた地震計は速度型地震計であったので、速度値から変位値へと単位変換を行った。

次に、前述の観測データの解析のように正転と逆転の合成を行った。

最後に、震源特性を求めた。震源の運動を記述するため剛体運動近似を用い、震源近傍の地震計のデータから震源の特性を求めた。そして、変位値から力[N]へと単位変換を行った。

2.3.3 伝達関数

伝達関数は、地震波が伝わってきた地下の構造特性を表し、観測データと震源特性のデコンボリューションによって求められる。

伝達関数を求めるには、まず、観測データと震源特性の軸を統一する必要がある。そのため地震計と震源の座標変換を行う。図 8 に示すように、各観測点と震源を結ぶ方向を Radial (R) 方向、R 方向と直行する方向を Transvers (T) 方向とした。それぞれの座標系から、RT 座標系へと変換する式は以下の通りである。

$$\begin{bmatrix} U_r \\ U_t \\ U_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\lambda & -\sin\lambda & 0 \\ \sin\lambda & -\cos\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_R \\ F_T \\ F_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix}$$

λ , ψ はもとの座標系と RT 座標系のずれの角度を表す。この座標系における伝達関数は、次のように表される。

$$\begin{bmatrix} U_r \\ U_t \\ U_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{rR} & H_{rT} & H_{rZ} \\ H_{tR} & H_{tT} & H_{tZ} \\ H_{zR} & H_{zT} & H_{zZ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_R \\ F_T \\ F_Z \end{bmatrix}$$

縦置き回転型震源の加振は水平方向のみであるため、得られる伝達関数は R, T 方向の 6 成分である。

そして、伝達関数は、観測値と震源特性のデコンボリューションによって求められる。今、観測値も震源特性も周波数領域であるので、畳み込み定理より以下のように伝達関数を求められる。

$$H_f = U_f / F_f$$

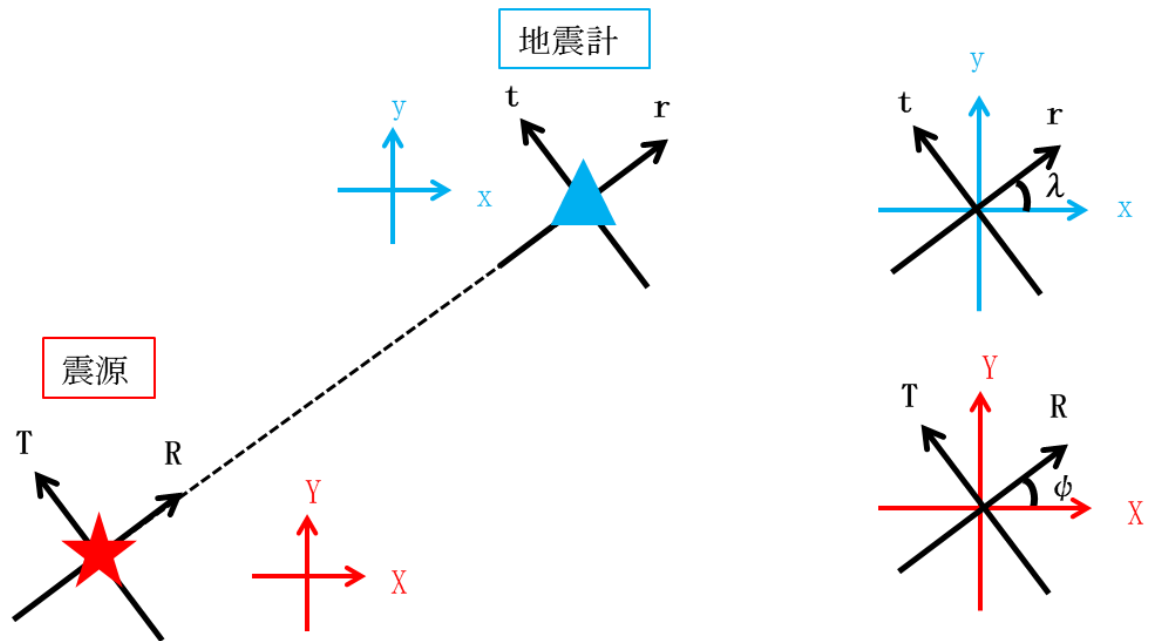


図 8 伝達関数を求めるための地震計と震源の座標変換

震源と地震計の座標が異なるため、それらの座標を統一する必要がある。各観測点と震源を結ぶ方向を **Radial (R)** 方向、R 方向と直行する方向を **Transvers (T)** 方向とする。このとき、震源の座標系と RT 座標系のずれを ϕ 、地震計の座標系と RT 座標系のずれを λ とする。

2.3.4 周波数ごとの振幅の時間変化の推定

求めた伝達関数の時間変化を調べるため、散乱地震学における isochronal scattering shell(シェルモデル)¹⁰⁾を用いる。これは、図9に示すように、送信点と受信点を焦点とした楕円殻上のあらゆる点からの散乱波（コーダ波）の走時は同じであるとする考え方である。つまり、対象とする時間区間に震源から観測点に到達するコーダ波は、震源と各観測点を焦点とする楕円殻より散乱される波と仮定でき、その散乱点に位置する不均質のスケールは散乱される波の波長と同程度と考えられる。ここで、不均質とは、地下が均質であると仮定したとき、空気や水などの周囲と異なる媒質を指す。そこで、任意の走時に注目することで、地下の異なる範囲を解析対象とすることができる。本研究では、初動の1.5倍の走時から0.25秒の時間区間のデータを用いて、対象の波が散乱された範囲を求めた。

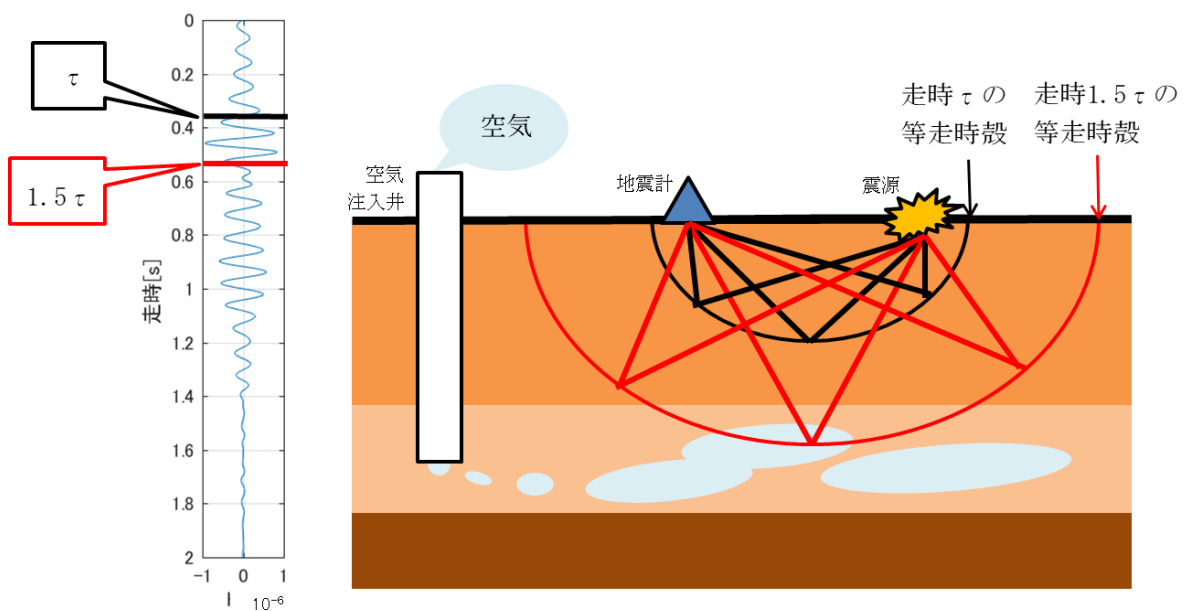


図9 シェルモデルの模式図

対象とする時間区間に震源から観測点に到達するコーダ波は、震源と各観測点を焦点とする楕円殻より散乱される波と仮定できる。走時 τ の等走時殻は黒線、走時 1.5τ の等走時殻は赤線で表されるような楕円殻となる。その楕円殻上に不均質が存在するとき、不均質のスケールは、その点において散乱された波の波長と同程度と考えられる。

2.4. 解析結果

解析は、送信されたアクロス信号の信号周波数に着目して行う。地下の不均質と波長のスケールが同程度であったときに共鳴や散乱が起こり、振幅が増大もしくは減衰すると仮定する。波の基本式より、波長は、地震波速度と周波数から求められるため、地震波速度が一定だと仮定すると周波数に依存する。したがって、振幅が増加した周波数から不均質のスケールを推定できる。そこで、本研究では、地下の不均質と地震波の波長が同程度のスケールのとき、その波長と対応する周波数の振幅が増加する、という考えのもと解析を行う。

2.4.1 走時の遅れ

はじめに、解析方法で述べたように伝達関数を求め、各観測点、各伝達関数成分の走時の遅れを求めた。まず、空気注入前の2月22日0時～2月23日23時（計48時間）の平均の波形を基準とした。そして、2月22日0時～3月7日23時（計336時間）の各波形の走時の、基準に対する遅れを調べた。ただし、200Hz サンプリングの地震計を用いたので、得られた伝達関数の時系列データの間隔は、0.005秒である。そのため、到達時刻の基準との差が ± 0.005 秒の場合は観測誤差の範囲内とみなし、 ± 0.010 秒以上の差を有意な遅れとした。表2は、有意な走時の遅れを調べたものである。

表2に示されるように、有意な走時の遅れは、観測点4, 5, 6, 7, 8, 9, 10および11の8つの観測点にみられた。例えば、観測点6では最大の -0.045 秒、平均では -0.020 秒であった。一方、それ以外の観測点、特に、注入点の西側に配置された観測点16から観測点32については、地震波形記録上での明確な時間変化が確認できなかった。これは、鶴我ほか（2011）においても指摘されている。そこで、以降の解析は、走時の遅れがみられた、観測点4, 5, 6, 7, 8, 9, 10および11の8つの観測点に絞って行う。

表 2. 走時の遅れ([秒])

32 観測点, 伝達関数 6 成分について, ± 0.010 秒以上の走時の遅れを示す.

観測点	H_{rR}	H_{rT}	H_{tR}	H_{tT}	H_{zR}	H_{zT}
st1						
st2						
st3						
st4					-0.015	
st5		+0.05			-0.015	-0.015
st6	-0.015	-0.015	-0.015	-0.045	-0.015	-0.015
st7					-0.015	-0.015
st8		-0.015			-0.015	-0.015
st9		-0.015		-0.015		-0.015
st10					-0.015	
st11					-0.015	
st12						
st13						
st14					-0.015	-0.015
st15						
st16						
st17						
st18						
st19						
st20						-0.01
st21						
st22						
st23						
st24						
st25						
st26						
st27						
st28						
st29						
st30						
st31						
st32						

2.4.2 周波数ごとの振幅の時間変化

次に、周波数ごとの振幅の時間変化を調べる。求めた伝達関数は周波数領域であるため、2月22日0時～3月7日23時（計336時間）の1時間ごとに前述の解析を繰り返すことで、10Hz～30Hzの周波数帯域の0.01Hz間隔の振幅の時間変化がわかる。ここで、走時の遅れを調べたときと同様に、空気注入前の2月22日、2月23日の平均の波形を基準した。そして、基準波形の振幅と各時間の波形の振幅の差分の比（振幅比）を求めた。その一例として、図10に、観測点8、伝達関数成分 H_T の周波数ごとの振幅比を示す。

図10に示されるように、空気注入後に振幅が大きく変化している周波数（18.06 Hz, 23.11 Hz）がある。これらとその前後の周波数を取り出して時間変化をみたものが図11である。周波数18.06 Hz（図11(a)赤実線）では、空気注入開始2日目（2月27日）に最大の振幅となり、空気注入前の基準の約160倍に増加した。その後、振幅は徐々に減少し、空気注入終了4日目（3月6日）に基準の約50倍となった。さらにその後、再び振幅が増加し約100倍となった。周波数18.06 Hz前後の周波数をみると、18.06 Hz（図11(a)赤実線）～18.71 Hz（図11(a)青実線）の振幅変化も、変化率は18.06 Hzより小さいが同様の傾向であった。しかし、17.22 Hz（図11(a)青点線）は、空気注入終了4日目（3月6日）以降に振幅が再び増加することなく、減少傾向が続いた。周波数23.11 Hz（図11(b)赤実線）では、空気注入開始後から比較的緩やかに振幅が増加し、空気注入開始5日目（3月2日）に最大で基準の200倍となった。その後、空気注入終了時（3月3日）までに約100倍まで減少し、空気注入終了4日目（3月6日）には基準の約50倍となった。そして、18.06 Hzと同様に再び振幅が増加し、約200倍となった。周波数23.11 Hzの前後の周波数帯域の振幅変化も、変化率は23.11 Hzよりも小さいが、同様の傾向であった。

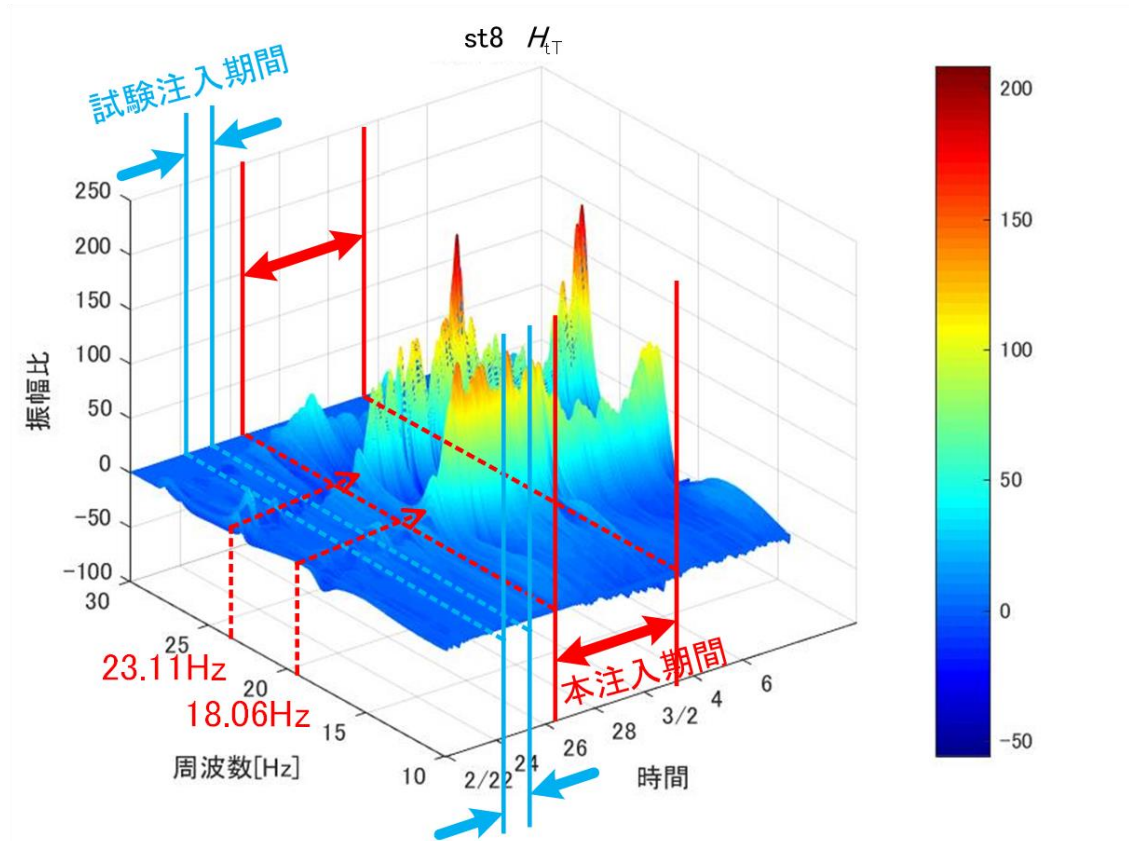


図 10 観測点 8— H_{tT} の各周波数における振幅の時間変化

観測点 8, 伝達関数成分 H_{tT} の各周波数 (y 軸) の振幅比 (z 軸) の時間変化 (x 軸) を示す. 空気注入開始後, 18.06 Hz 前後, 23.11 Hz 前後では振幅が増加している.

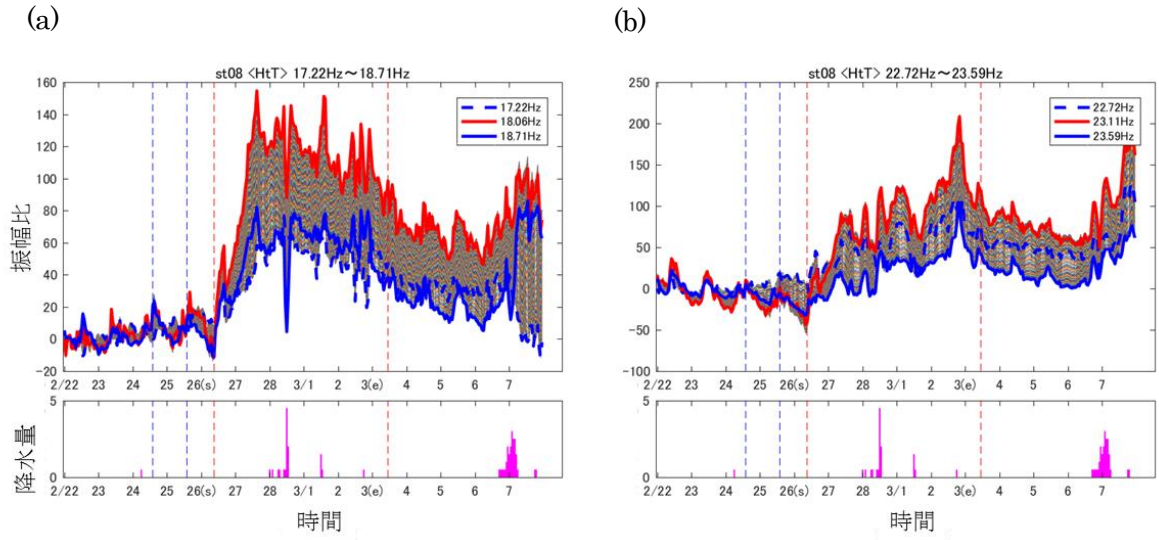


図 11 観測点 8— H_T において、空気注入開始後に増加した振幅変化の様子

(a) 周波数帯域 17.22 Hz～18.71 Hz のスペクトルの振幅変化の様子

青点線: 17.22 Hz, 赤実線: 18.06 Hz, 青実線: 18.71 Hz

(b) 周波数帯域 22.72 Hz～23.59 Hz のスペクトルの振幅変化の様子

青点線: 22.72 Hz, 赤実線: 23.11 Hz, 青実線: 23.59 Hz

3. 検討・考察

3.1 気象データや潮汐の時間変化との相関関係

ここでは、伝達関数の振幅を変化させる要因を検討・考察する。それは、震源や地震計、地中を伝わる間に受けた影響などがある。具体的には、震源の振動の理論値とのずれや、気象の影響、空気注入の影響が考えられる。本研究で対象とするものは、空気注入による振幅変化であるので、それ以外の要因による変化は除去していく。ただし、震源の振動は、本城ほか（2015）により補正されているので、影響は最小限であると考えられる。そこで、外部要因として、気象（気温、気圧、湿度、降雨）および潮汐の時間変化との関連について検討する。

3.1.1 気温、気圧、湿度および潮汐との相関関係

気象の影響を検討するため、気温、気圧、湿度および潮汐の4項目について、伝達関数の周波数ごとの振幅変化との相関関係を調べた。降雨との相関関係は後述する。上記4項目と伝達関数の振幅変化の相関関係を図12に示す。横軸は観測点番号を表す。縦軸は、それぞれ気温、気圧、湿度および潮汐の時間変化と伝達関数の周波数ごとの振幅変化との相関値を表す。

その結果、有意な相関関係がみられたのは、気温と気圧であった。気温は1日周期であるが、図11にも示されるように伝達関数の振幅変化にも1日周期の小さな増減がみられる。これが、気温の影響によるものだと考えると、空気注入後の大きな振幅変化と比較すると無視できる。また、気圧は降雨と関係があるので、気圧との相関関係が高いということ、振幅変化への降雨の影響が大きいといえる。

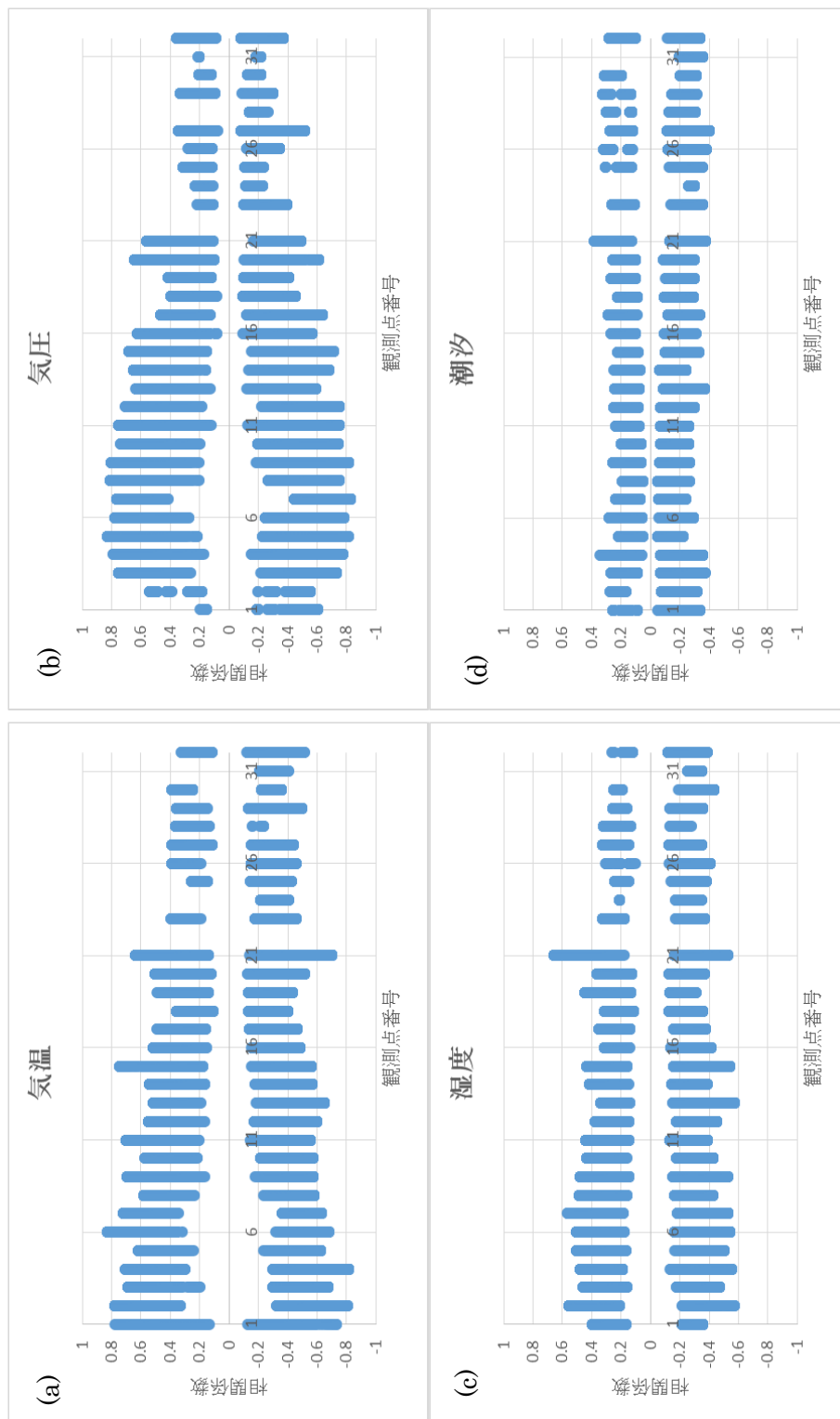


図 12 気象（気温，気圧，湿度）および潮汐と伝達関数の振幅変化との相関
 (a) 気温 (b) 気圧 (c) 湿度 (d) 潮汐
 気象や潮汐の影響を受け振幅変化が起こるとき（負の時間ずれ）の相関係数を示す．

3.1.2 降雨と伝達関数の振幅変化

伝達関数の振幅変化と降雨との関係に注目した。図 11(a)図中の周波数 18.06 Hz（赤実線）と 18.71 Hz（青実線）や、図 11(b)図中の振幅変化は、降雨のある直後、もしくは数時間程度の遅れをもって振幅の増加が認められる。特に、空気注入終了以降の 3 月 6 日～7 日の降雨時には振幅の変化は顕著であった。しかし、図 11(a)の図中に示す周波数 17.22 Hz（青点線）の振幅変化は、降雨があってもその前後の時間と同様の傾向であることがわかる。このように降雨のある時間に振幅が増加するような周波数は、降雨の影響が大きく空気注入の影響と明確に区別することができないため解析対象から除くこととした。

振幅変化が降雨または空気注入の影響なのかを区別するために設けた判別基準は以下のとおりである。

- (1) 空気注入による有意な変化をみつける。地震波は 1 日の中でも変化しているため、通常の日変動による振幅変化なのか、空気注入による振幅変化なのかを区別するために、標準誤差を用いる。ここで、標準誤差 (σ) は、2 月 22 日 0 時～2 月 23 日 23 時（計 48 時間）から求め、基準波形の振幅と各時間の波形の振幅の差が $+2\sigma$ 以上であった場合のみ、有意な変化とする。

- (2) 降雨の影響が特に大きく表れる周波数とそうでない周波数を分別する。空気注入が終了している時期の降雨の後（3 月 6 日 17 時以降）に振幅が増加した周波数は除く。

このような判別基準により、観測点 8 において、降雨の影響が比較的小さく、空気注入により振幅が増加したといえる周波数を表 3 に示す。また、図 13 にその周波数の振幅変化を示す。

降雨の影響が比較的小さく、空気注入により振幅が増加したといえる周波数は、伝達関数成分によって異なっていた。それは、観測点 8 の H_{R} 成分では、周波数帯域 10.00 Hz～14.50 Hz, 17.60 Hz～19.20 Hz, 21.30 Hz～23.50 Hz, および 25.20 Hz～27.50 Hz であった。振幅の基準に対する変化率は、最大（ある短時間に突出して大きいものは除く）でそれぞれ、約 80 倍, 30 倍, 90 倍, および 100 倍であった。 H_{T} 成分では、周波数帯域が 13.00 Hz～18.00 Hz, 最大振幅変化率が約 60 倍であった。 H_{R} 成分では、周波数帯域が 12.50 Hz～17.10 Hz, 最大振幅変化率が約 40 倍であった。 H_{T} 成分では、周波数帯域が 15.50 Hz～17.80 Hz, および 26.20 Hz～28.30 Hz, 最大振幅変化率がそれぞれ、約 140 倍, 50 倍であった。 H_{R} 成分では、周波数帯域が 24.20 Hz～24.80 Hz, 最大振幅変化率が約 300 倍であった。 H_{T} 成分では、周波数帯域が 12.00 Hz～15.80 Hz, 最大振幅変化率が約 80 倍であった。

表 3. 観測点 8 の空気注入の影響が大きい周波数 [Hz]

H_{fR}	10.00~14.50 , 17.60~19.20 , 21.30~23.50 , 25.20~27.50
H_{fT}	13.00~18.00
H_{tR}	12.50~17.10
H_{tT}	15.50~17.80 , 26.20~28.30
H_{zR}	24.20~24.80
H_{zT}	12.00~15.80

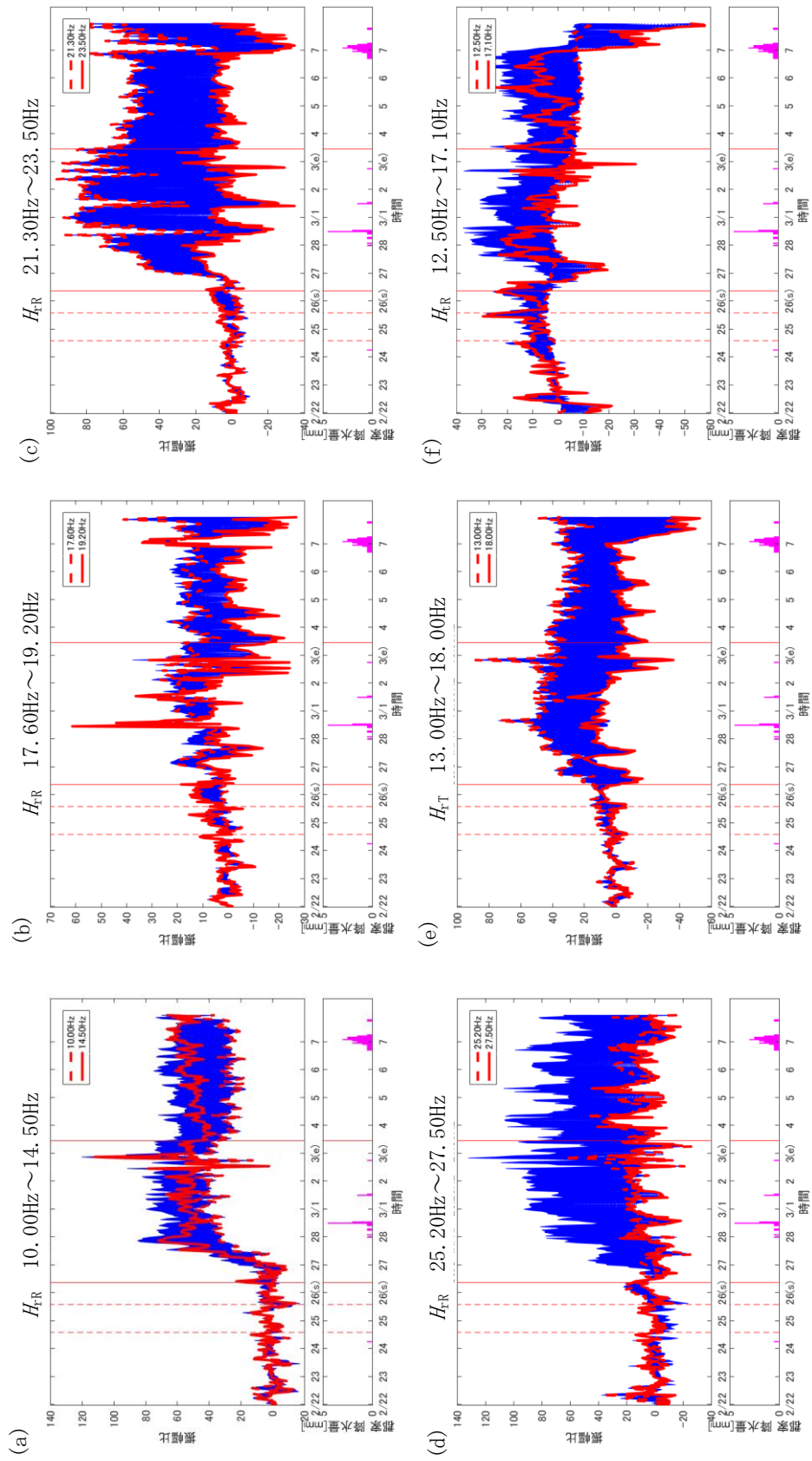


図 13 観測点 8 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化

(a) H_{rR} 10.00 Hz ~ 14.50 Hz (b) H_{rR} 17.60 Hz ~ 19.20 Hz (c) H_{rR} 21.30 Hz ~ 23.50 Hz
 (d) H_{rR} 25.20 Hz ~ 27.50 Hz (e) H_{rT} 13.00 Hz ~ 18.00 Hz (f) H_{rR} 12.50 Hz ~ 17.10 Hz
 空気注入開始後に振幅が増加かつ降雨の影響が小さいと考えられる周波数の振幅変化を表す。

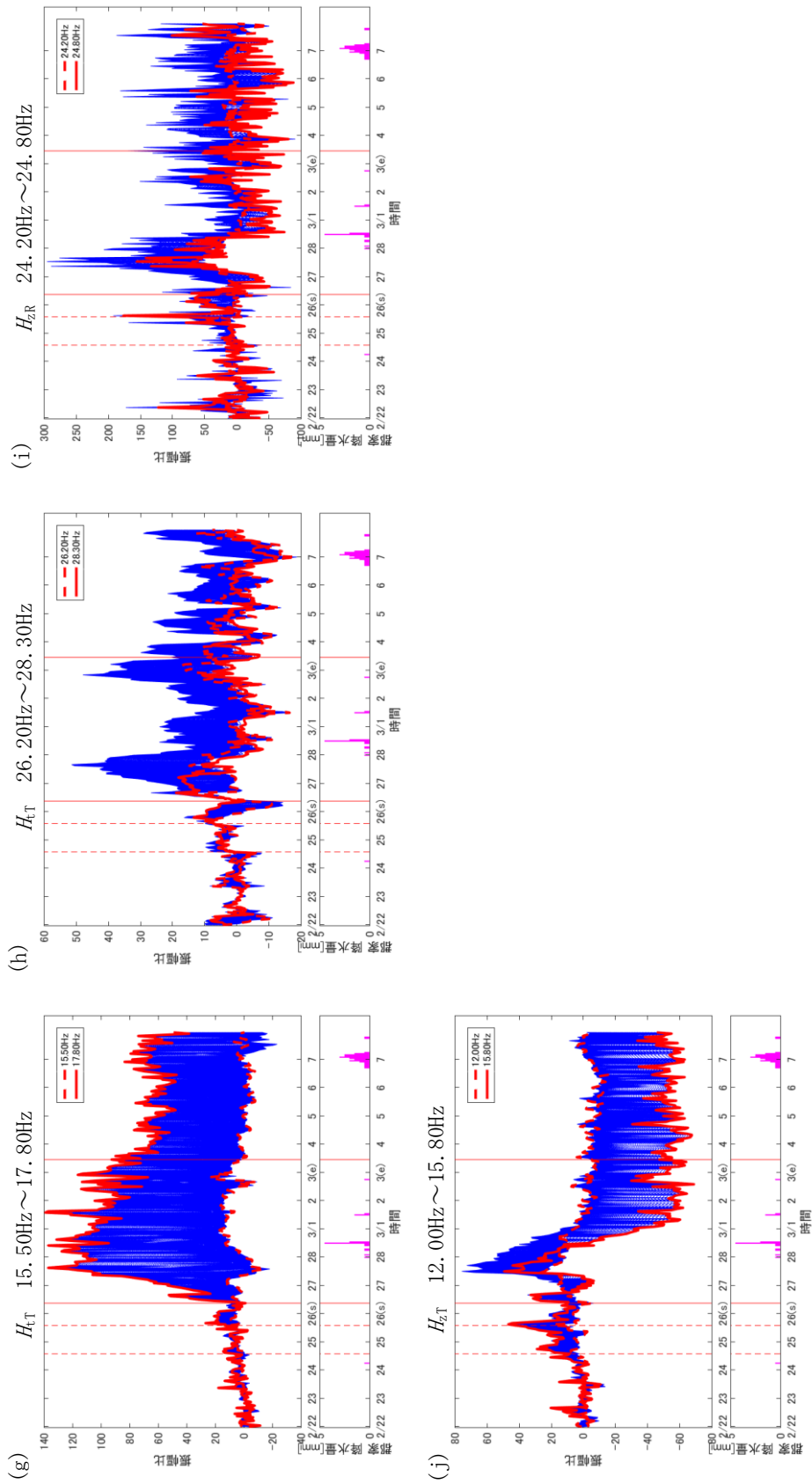


図 13 観測点 8 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(g) H_{tT} 15.50 Hz ~ 17.80 Hz (h) H_{tT} 26.20 Hz ~ 28.30 Hz (i) H_{zR} 24.20 Hz ~ 24.80 Hz

(j) H_{zT} 12.00 Hz ~ 15.80 Hz

空気注入開始後に振幅が増加かつ降雨の影響が小さいと考えられる周波数の振幅変化を表す。

3.2 振幅の変化様式の分類

3.2.1 振幅変化の分類

空気注入に伴って変化の生じた信号周波数のスペクトル振幅の時間変化の様式の分類について述べる。

図 13 に示されるように、観測点 8 の振幅変化は、ほとんどの周波数において、空気注入開始後に振幅が増加し、空気注入終了以降もそれを維持しているのがわかる。また、図 14 に他の観測点の振幅変化 ((a)観測点 10— H_T —23.00 Hz～24.30 Hz と(b)観測点 7— H_R —17.30 Hz～21.10 Hz) を示す。図 14(a)では空気注入終了後に振幅が減少するが、図 14(b)では空気注入開始後に最大になった後減少し始める。

振幅変化の様式は次のような 3 つの Type に分類することができる。また、各様式の模式図を図 15 に示す。

(1) Type1

空気注入開始後、振幅が増加し最大になり、空気注入終了以降もその振幅を維持する。例えば、図 13 の観測点 8— H_R —10.00 Hz～14.50 Hz に見られる変化が相当する。

(2) Type2

空気注入開始後、振幅が増加し最大になる。空気注入中はその振幅を維持する、もしくは少々減少する程度だが、注入終了以降減少傾向にある。例えば、図 14(a)の観測点 10— H_T —23.00 Hz～24.30 Hz に見られる変化が相当する。

(3) Type3

空気注入開始後、振幅が増加し最大になった後、減少する。例えば、図 14(b) の観測点 7— H_R —17.30 Hz～21.10 Hz に見られる変化が相当する。

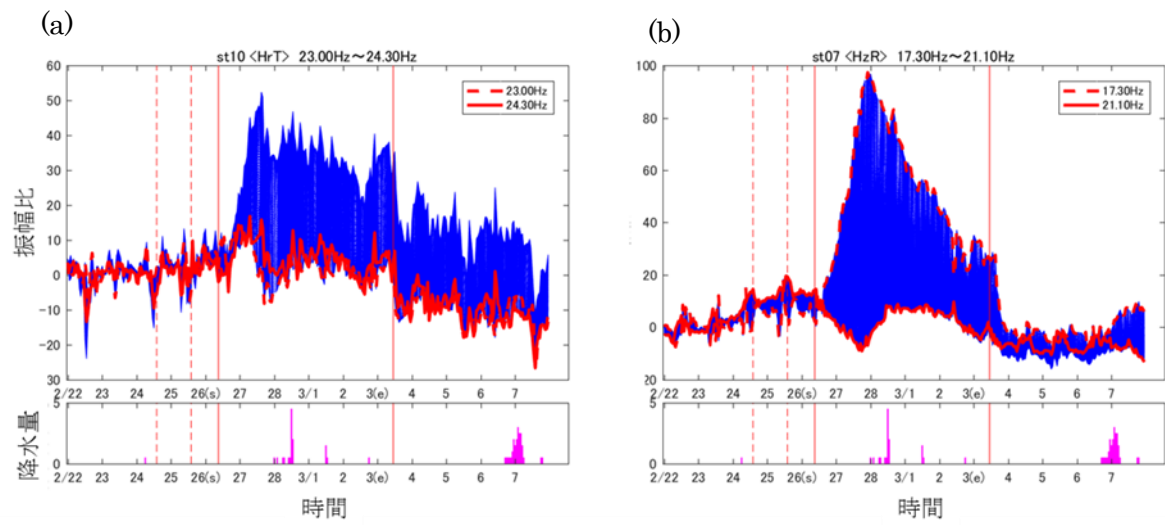


図 14 空気注入の影響が大きい周波数帯域の振幅変化

(a) 観測点 10— H_T —23.00 Hz~24.30 Hz

(b) 観測点 7— H_{zR} —17.30 Hz~21.10 Hz

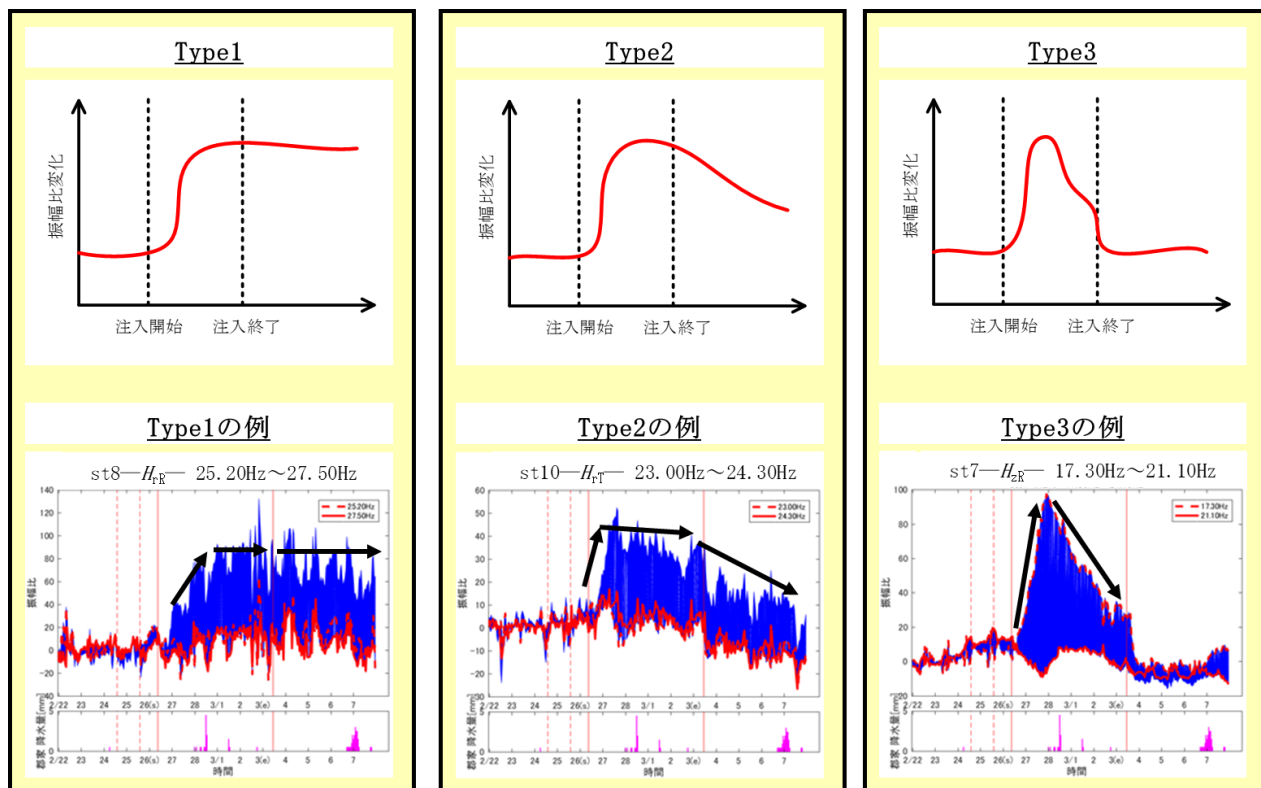


図 15 振幅変化の各様式の模式図

Type1は、空気注入開始後、振幅が増加し最大になり、空気注入終了以降もその振幅を維持する。例えば、観測点 8— H_{FR} —10.00 Hz～14.50 Hz がある。Type2は、空気注入開始後、振幅が増加し最大になる。空気注入中はその振幅を維持する、もしくは少々減少する程度だが、空気注入終了以降減少傾向にある。例えば、観測点 10— H_T —23.00 Hz～24.30 Hz がある。Type3は、空気注入開始後、振幅が増加し最大になった後、減少する。例えば、観測点 7— H_{ZR} —17.30 Hz～21.10 Hz がある。

3.2.2 振幅変化と地下構造モデルの関係

不均質の移動に関する地下の構造を考える。不均質は、空気注入があることによってスケールが変化したり移動し得るものと考え、注入された空気や元々地下に存在する水が想定できる。それらは岩石の孔隙中を移動するが、特にたまりやすい構造があったときはその場所に集まる。そして、図 16 に示すように、その構造へ不均質が供給されていき許容量に達したとき、弁が破壊され漏洩が始まる。このように不均質の移動を考え、不均質の量が増加すれば（不均質のスケールが大きくなれば）、ある周波数の波が敏感に反応する大きさに近づくため、その周波数の振幅は増加する。不均質の量が変化しなければ振幅も変化しない。このとき、振幅変化の分類で示した各様式が示唆する地下の構造のモデルを表 4 に示す。Type1 の振幅変化が示唆する構造は、漏洩のための道がないため、空気注入期間中に不均質の供給のみが起こり、不均質が貯留される構造である。Type2 が示唆する構造は、供給と漏洩がほぼ等しく起こるため、空気注入期間中は不均質量は変わらないが、注入が終了すると、漏洩のみが起こり不均質は徐々に減少する構造である。Type3 が示唆する構造は、供給よりも漏洩の道の方が大きいため、空気注入期間中から不均質量が大きく減少するような漏洩が顕著な構造である。

そして、観測点 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 および 11 において空気注入の影響が明確な振幅変化がどの様式に当てはまるかを検証し、各様式がどの観測点でみられたかを調べた結果が表 5 である。観測点 4, 5, 8, 9 および 10 では、貯留構造を示唆する Type1 が多くみられた。観測点 6, 7, 11 では、漏洩構造を示唆する Type3 が多くみられた。

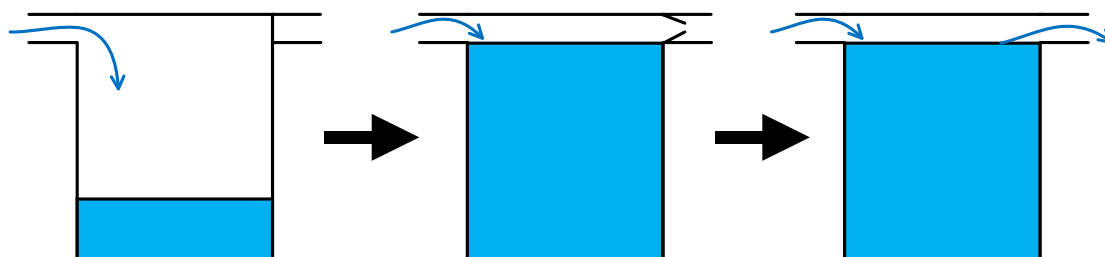


図 16 不均質の供給と漏洩のモデル

不均質の供給が始まると、そこに貯留される不均質が徐々に増加する。許容量に達したとき漏洩側の弁が開き、漏洩が始まる。

表 4. 振幅変化の各様式と地下構造のモデル

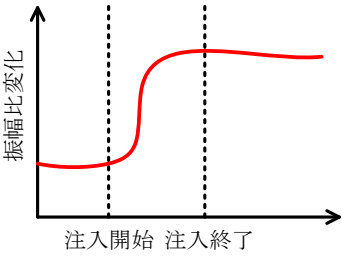
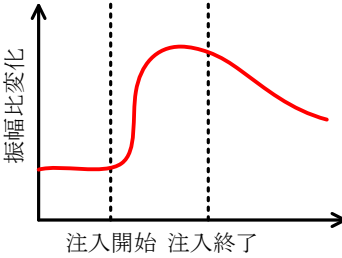
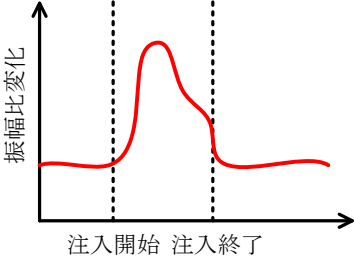
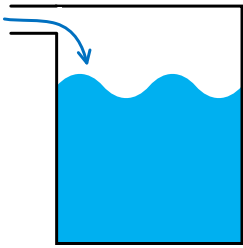
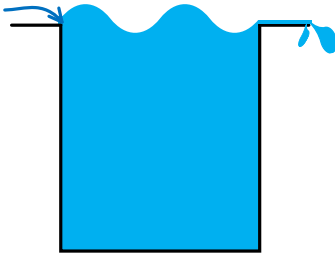
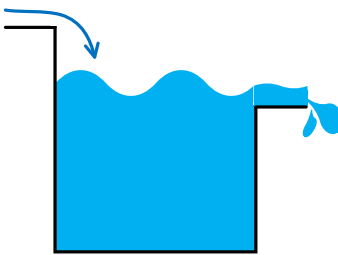
	Type1	Type2	Type3
振幅 変化			
地下 構造 のモ デル	 <p>空気注入開始後、不均質が供給され許容量に達する。不均質の漏れ出す道がないため、それ以降は、貯留され続ける。</p>	 <p>空気注入開始後、不均質が供給され許容量に達する。その後、ほぼ等しい流量で供給と漏洩が起こるため、注入中はある振幅比を維持する、もしくは少々減少する程度だが、供給が終わると漏洩のみが起こり、不均質量は徐々に減少する。</p>	 <p>空気注入開始後、不均質が供給され許容量に達する。その後、供給される量よりも漏洩する量のほうが多いため、不均質量は減少する。漏洩が顕著な構造である。</p>

表 5. 各観測点における振幅変化のタイプ

◎：多い, ○：少ない

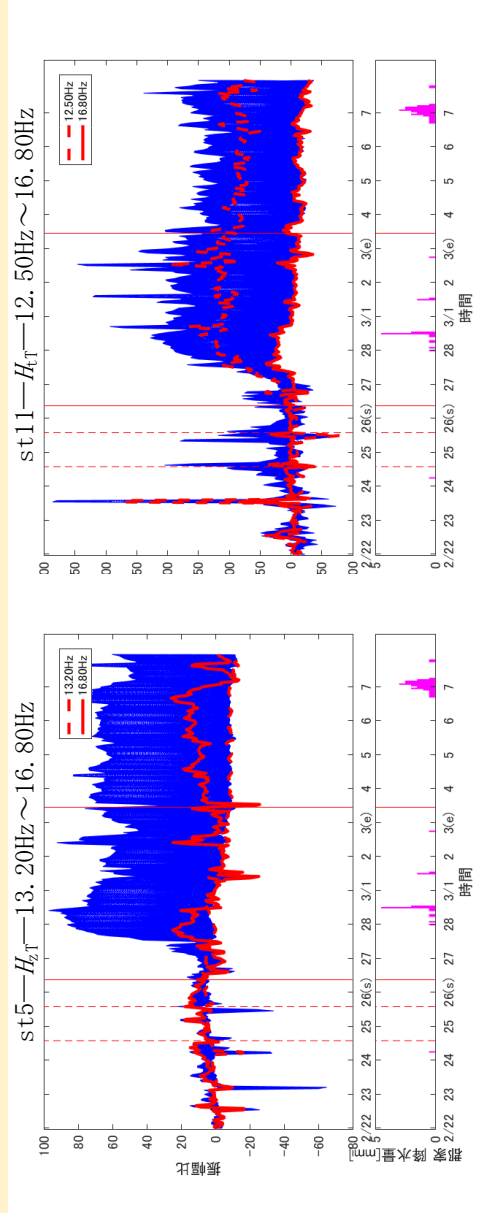
	Type1	Type2	Type3
st4	◎	○	
st5	◎		○
st6	○	○	◎
st7		○	◎
st8	◎	○	○
st9	◎	○	○
st10	◎		○
st11	○		◎

3.3 不均質のスケールと分布の推定

3.3.1 不均質のスケールの推定

不均質のスケールを，周波数から推定する．図 17 に示すように，同様の周波数帯域における各観測点の振幅変化を比較すると，変化の仕方が類似しているものがあつた．例えば，観測点 5— H_z —13.20 Hz～16.80 Hz と観測点 11— H_z —12.50 Hz～16.80 Hz である．つまり，これらの波に影響を与えた不均質のスケールは同程度である可能性がある．そのスケールは，周波数と対応する波長である．考えられる不均質のスケールは，想定する地震波の走度によって異なる．地震波速度は，鶴我ほか（2011）で P 波速度～2500 m/s，S 波速度～1000 m/s と報告されている．今，解析している初動より 1.5 倍遅れた波は PS 変換波であるので，地震波の速度は，1200 m/s ～2000 m/s 程度であると考えられる．この速度を用いて，同様の周波数帯域における振幅変化が類似しているものから，不均質のスケールを推定したものを表 6 にまとめた．例えば，観測点 5 や観測点 11 では，推定される不均質のスケールは，地震波速度 1200 m/s のときは最小で 82 m 程度，地震波速度 2000 m/s のとき最大で 138 m 程度である．

(a)



(b)

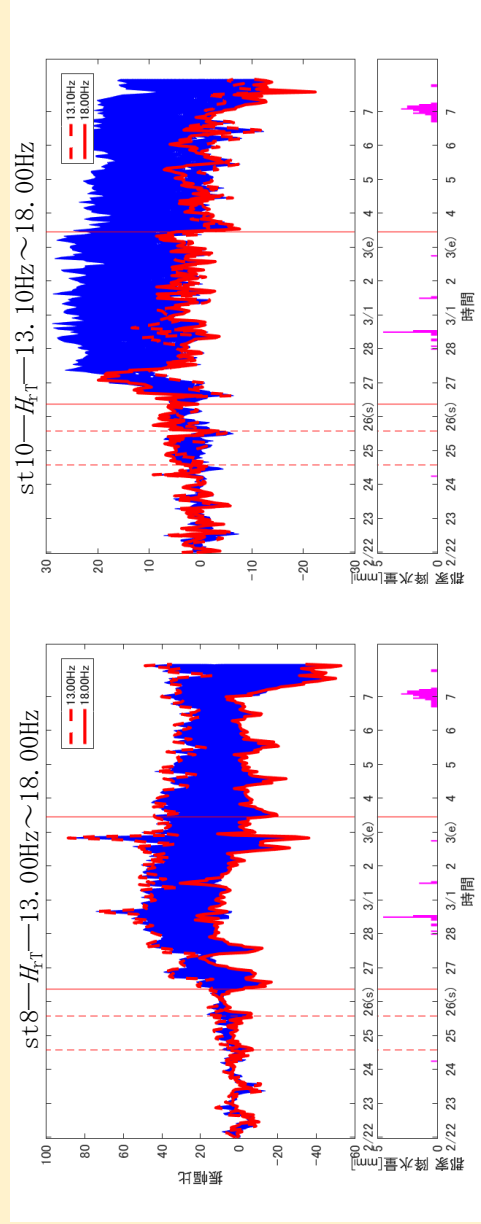
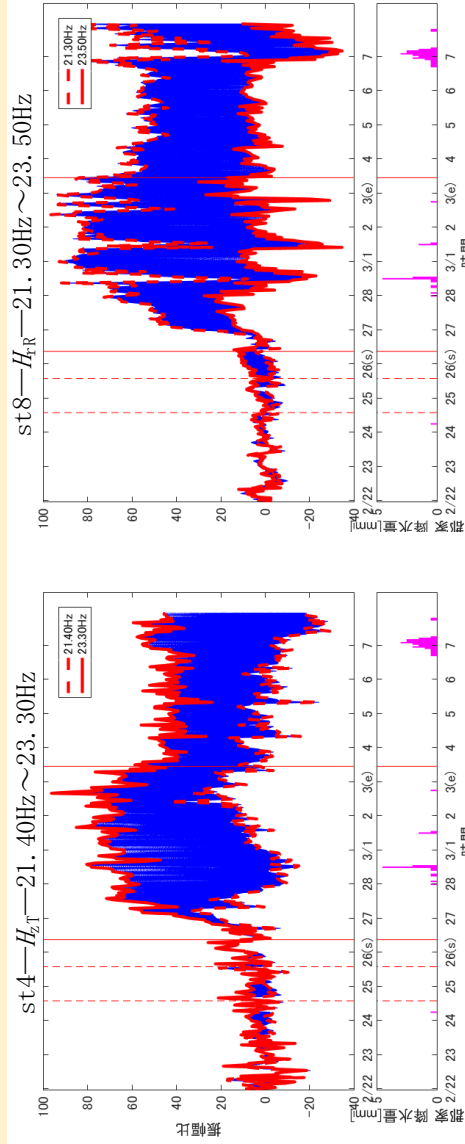


図 17 同様の周波数帯域において類似する振幅変化

(a) 12.50 Hz～16.80 Hz (b) 13.00 Hz～18.00 Hz

(c)



(d)

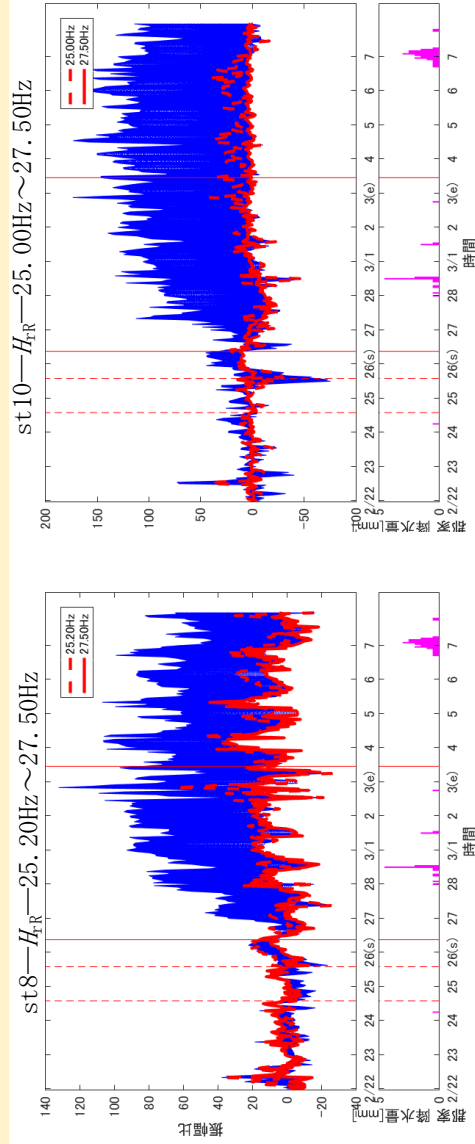


図 17 同様の周波数帯域において類似する振幅変化 (続き)

(c) 21.30 Hz~23.50 Hz (d) 25.00 Hz~27.50 Hz

表 6. 不均質のスケール

構造タイプ	観測点—伝達関数成分—周波数	不均質のスケール	
		最小	最大
		地震波速度 1200 m/s	地震波速度 2000 m/s
Type1	st5— H_{zT} —13.20 Hz～16.80 Hz st11— H_{tT} —12.50 Hz～16.80 Hz	82 m ± 11 m	138 m ± 19 m
Type1	st8— H_{rT} —13.00 Hz～18.00 Hz st10— H_{rT} —13.10 Hz～18.00 Hz	80 m ± 12 m	132 m ± 22 m
Type1	st4— H_{zT} —21.40 Hz～23.30 Hz st8— H_{rR} —21.30 Hz～23.50 Hz	54 m ± 2 m	90 m ± 4 m
Type1	st8— H_{rR} —25.20 Hz～27.50 Hz st10— H_{rR} —25.00 Hz～27.50 Hz	46 m ± 2 m	76 m ± 4 m

3.3.2 不均質の分布の推定

3.3.1 で推定された不均質の空間分布を検討する.

本研究での解析は, シェルモデル (2.3.4 を参照) を用いている. そこで, 各観測点における対象の時間区間の波が不均質によって散乱される空間範囲を求める. 観測点 8 を例に, 図 18 にしたがって説明する.

観測点 8 の震源との距離は $\ell=451.63$ m, 初動の走時は約 0.60 秒であった. そして, 対象の初動の 1.5 倍の走時は 0.90 秒であり, その伝播距離は次のようになる.

$$2b=1080\sim 1800\text{ m}$$

よって, 深さ方向の楕円半径は

$$h=491\sim 871\text{ m}$$

となり, T 方向の半径も同様である. また, 円周上の 1 点と 2 つの焦点までの距離の和は等しくなるという楕円の性質から,

$$a=(2b - 340)/2=314\sim 674\text{ m}$$

であるので, R 方向の楕円半径は次のようになる.

$$a + \ell/2=540\sim 900\text{ m}$$

ここで, 空気注入は深度 100 m であるので, $z=100$ m の楕円の円周を求めると, R 方向, T 方向の半径はそれぞれ, 529~894 m, 480~865 m となる. このような方法で, 各観測点の楕円半径を求め, 表 7 に示す. ただし, 対象の時間区間が初動の 1.5 倍から 0.25 秒間であるので, 不均質の存在し得る範囲の上限は地震波速度 2000 m/s のときの初動の 1.5 倍から 0.25 秒走時のとき, 下限は地震波速度 1200 m/s のときの初動の 1.5 倍走時のときである.

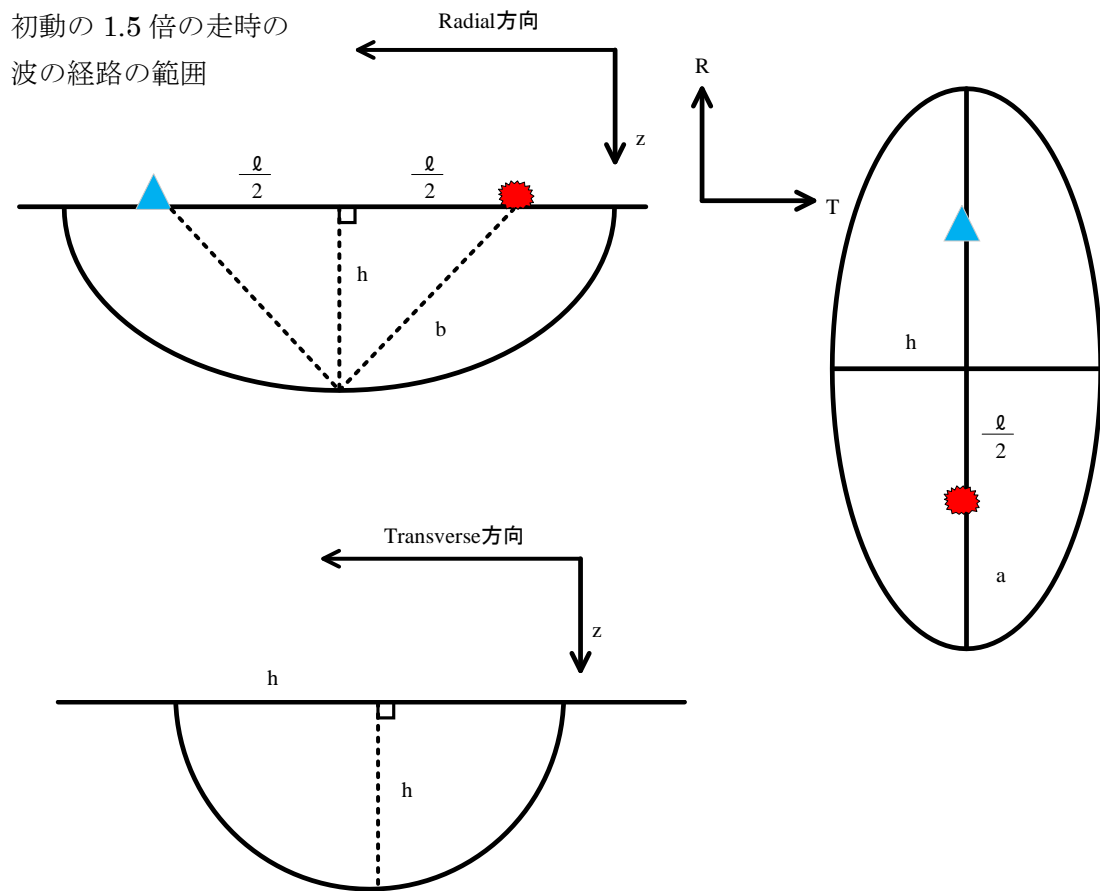


図 18 楕円半径の求め方

表 7. 楕円半径 [m]

観測点	最大 R 半径	最大 T 半径	最小 R 半径	最小 T 半径
	・ 地震波速度 2000 m/s ・ 初動の 1.5 倍 + 0.25 秒走時		・ 地震波速度 1200 m/s ・ 初動の 1.5 倍走時	
st4	1145	1125	529	485
st5	919	901	389	346
st6	768	749	292	246
st7	768	750	292	246
st8	1145	1123	529	480
st9	1221	1196	575	521
st10	1145	1122	529	487
st11	995	972	435	383

以上のように、各観測点における初動の 1.5 倍から 0.25 秒間の走時の波が散乱されたと考えられる等走時殻を求め、その空間（楕円）範囲を重ねたものを図 19 に示す。赤線が不均質の存在し得る範囲の上限、青線が下限の範囲である。観測点 4, 8, 9, 10 と観測点 6, 7 はそれぞれ不均質の存在範囲がほぼ同程度であることがわかる。灰線は断層であるが、空気注入点の北東、観測点 4, 8, 9, 10 の下限範囲付近で断層が分岐しており、野島断層とその東の分岐断層にわかれる。断層面には、岩盤がずれたことによって破壊された岩石が破碎帯として存在し、そこは亀裂が多いために水の通り道となる。そして、さらに破壊が進むと断層粘土になる。これは、亀裂が少なく遮水壁の役割を果たすため、水や空気などの流体は断層近くへ移動しても断層を越えることはなく、断層に沿った方向に移動する。そのため、断層分岐点では、三方から不均質の移動が妨げられ、貯留されやすい構造であるといえる。また、図 20 に示されるように、野島断層とその分岐断層に挟まれた地域では地層が東上がりになっている¹¹⁾。したがって、不均質は、東の分岐断層近くへ移動し、断層によって東への移動を妨げられると断層に沿って南北へ移動する。ここで、表 5 において、解析範囲に断層分岐点がある観測点 4, 8, 9, 10 でも、漏洩のある Type2 や Type3 が観測されたことは観測地域の南北方向の違いによると考えられる。つまり、分岐断層に到達した不均質のうち北へ移動したものは分岐点付近で貯留され、南へ移動したものは不均質の移動を妨げられるものがないので移動を続ける。

そして、スケールを推定した不均質の分布を考える。貯留構造は図 19 の下限範囲（青線）付近の断層分岐点辺りだとすると、地震波速度は 1200 m/s であるので、表 6 の不均質のスケールは表 8 に示すように絞ることができる。それらの分布は図 21 に示される。表 8 に示される 1～4 の振幅変化は貯留構造を示唆する Type1 であるので、推定されたスケールの不均質は、断層分岐点付近の各観測点の存在範囲が重なる場所に存在すると考えられる。例えば、表 8 に示される 1 は、スケールが 82 m 程度と推定されたが、それは、観測点 5 と観測点 11 が断層分岐点に近いところで重なる範囲、つまり、図 21 において 1 が指し示す黄色の範囲に存在する。

以上をまとめると、図 21 に示すように、空気注入によって移動する地下の不均質は、東の分岐断層の方へ移動し、断層によって東への移動を妨げられる。その後、断層に沿って南北に移動し、北側の断層の分岐する付近では貯留され、南側では漏洩していくと考えられる。

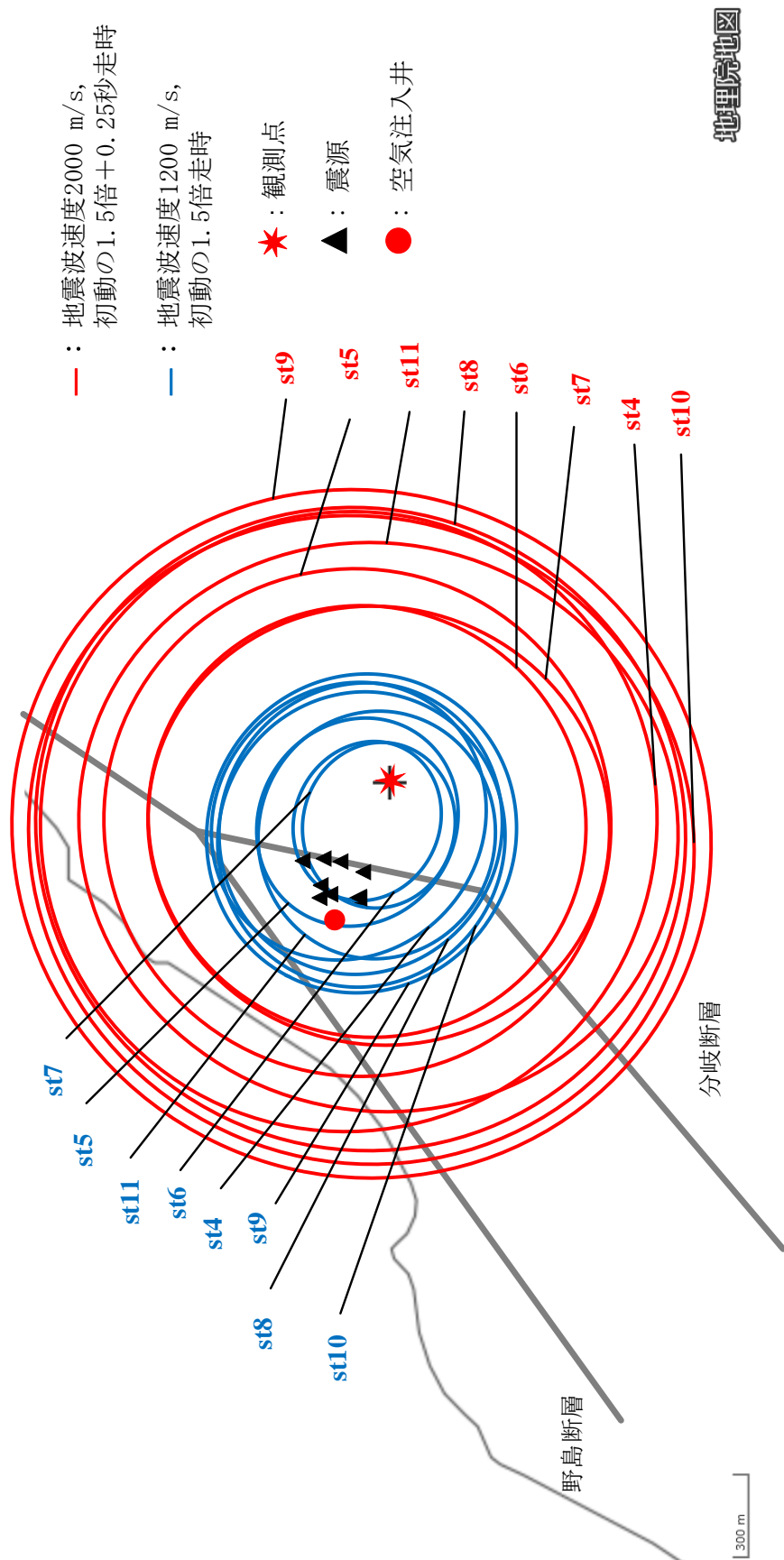


図 19 各観測点の不均質の存在範囲

赤線が不均質の存在し得る範囲の上限，青線が下限の範囲である．

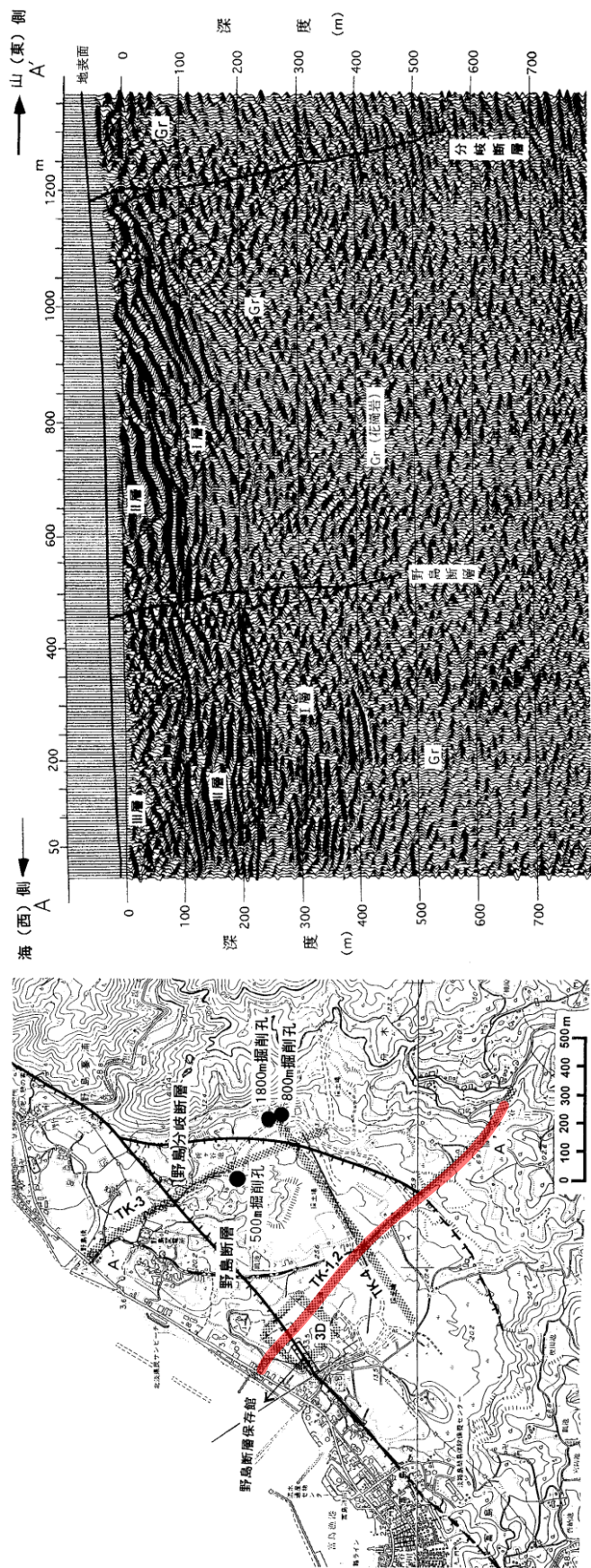


図 20 野島断層付近の反射法地震探査結果 (岡田ほか、(1998) に加筆)
観測地域の地層は、分岐断層に近づくほど上がっている。

表 8. 不均質のスケール（地震波速度 1200 m/s のとき）

	構造タイプ	観測点—伝達関数成分—周波数	不均質のスケール
1	Type1	st5— H_{zT} —13.20 Hz～16.80 Hz st11— H_{tT} —12.50 Hz～16.80 Hz	82 m ± 11 m
2	Type1	st8— H_{rT} —13.00 Hz～18.00 Hz st10— H_{rT} —13.00 Hz～18.00 Hz	80 m ± 12 m
3	Type1	st4— H_{zT} —21.40 Hz～23.30 Hz st8— H_{rR} —21.30 Hz～23.50 Hz	54 m ± 2 m
4	Type1	st8— H_{rR} —25.20 Hz～27.50 Hz st10— H_{rR} —25.00 Hz～27.50 Hz	46 m ± 2 m

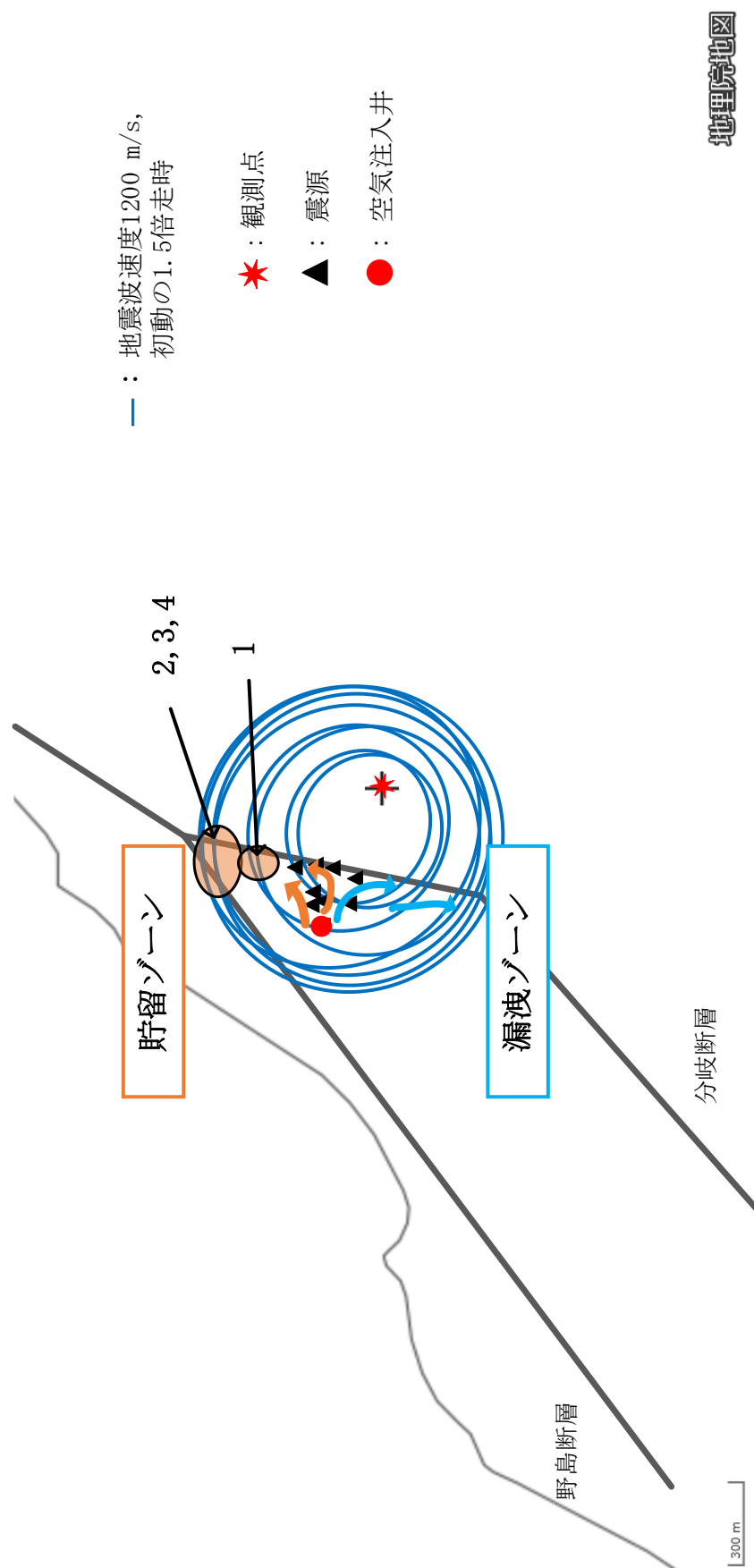


図 21 不均質の分布

不均質は、東の分岐断層の方へ移動し、断層によって東への移動を妨げられる。その後、断層に沿って南北に移動し、北側にある断層の分岐する付近では貯留され、南側では漏洩していく。

表 8 でスケールを推定した不均質は、対応する数字の示す場所に存在すると考えられる。

4. 結論

本研究は、地下貯留層とその周辺域の物理状態の変化を検出することを目的として、野島断層付近で行われた空気注入におけるモニタリング実証試験のデータ解析から、周波数依存性の評価を行った。各観測点の伝達関数の周波数ごとの振幅変化を求め、空気注入の影響が大きい周波数だけを解析することで、空気注入によって地下に発生、もしくは、移動した不均質のスケールや分布の推定を試みた。その結果、2点以上の観測点において、12.50 Hz～16.80 Hz 付近の周波数帯域での振幅の時間変化から 82 m 程度、13.00 Hz～18.00 Hz 付近の周波数帯域での振幅の時間変化から 80 m 程度、21.40 Hz～23.50 Hz 付近の周波数帯域での振幅の時間変化から 54 m 程度、25.20 Hz～27.50 Hz 付近の周波数帯域での振幅の時間変化から 46 m 程度のスケールの不均質構造とその空間分布を推定することができた。そして、不均質は観測地域の東の分岐断層に沿って南北に移動し、北部にある断層の分岐点付近では貯留されており、南部では漏洩しやすいという結論に達した。

今後の課題としては、不均質の移動をより詳細に調べられるように震源と受振点のアレイ配置の工夫が必要である。

謝辞

本研究は国際石油交流センター (JCCP) プロジェクトの一環として行われました。本プロジェクトに対する JCCP の方々のご理解と御支援に深く感謝いたします。

また、研究を進めるにあたって、御指導をいただきました指導教員の鶴我佳代子先生、東京海洋大学海洋資源エネルギー学部門の関野善広プロジェクト研究員、そして、協力していただいた海底資源研究室の皆様に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) パリ協定、外務省ホームページ <http://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000197313.pdf>
(アクセス日：2018年3月12日)
- 2) 日本の約束草案、環境省ホームページ
https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/mat01_indc.pdf
(アクセス日：2018年3月12日)
- 3) 二酸化炭素(CO₂)地中貯留の概要
公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) ホームページ
<https://www.rite.or.jp/system/research/underground-seq/>
(アクセス日：2018年3月12日)
- 4) 薛自求・渡辺二郎：“長岡実証試験サイトにおける二酸化炭素挙動モニタリングへの物理検層の適用”，*Journal of MMIJ*, Vol.124, p68-77 (2008)
- 5) 笠原順三・伊藤慎司・藤原友宏・羽佐田葉子・鶴我佳代子・生田領野・藤井直之・山岡耕春・西上欽也・伊藤潔：“淡路島野島断層付近におけるアクロス震源を用いたタイムラプス試験観測—観測結果(1)”，*物理探査学会第125回学術講演会論文集* (2011)
- 6) 鶴我佳代子・笠原順三・伊藤慎司・山岡耕春・生田領野・藤井直之・伊藤潔・西上欽也・山崎文人・本城泰樹：“淡路島野島断層付近におけるアクロス震源を用いたタイムラプス試験観測—観測結果(2)”，*物理探査学会第125回学術講演会論文集* (2011)
- 7) 本城泰樹・鶴我佳代子・笠原順三・山岡耕春・生田領野・伊藤潔：“地下への空気圧入に伴う地震波伝達関数の時間変化” (2015)
- 8) 熊澤峰夫・國友孝洋・横山由紀子・中島崇裕・鶴我佳代子：“アクロス：理論と技術開発、及び将来展望”，*サイクル機構技報*, No.9, p115-129 (2000)
- 9) Yamaoka, K., T. Kunitomo, K. Miyakawa, K. Kobayashi, M. Kumazawa : "A trial for monitoring temporal variation of seismic velocity using an ACROSS system", *The Island Arc*, 10, p336-347 (2001)
- 10) Sato, H., M. C. Fehler : "Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth", *Springer-Verlag New York, Inc.* (1997)
- 11) 岡田篤正・竹村恵二・加藤茂弘：“兵庫県南部地震を引き起こした野島断層の諸性質”，*人と自然*, No.9, p33-56 (1998)

付録

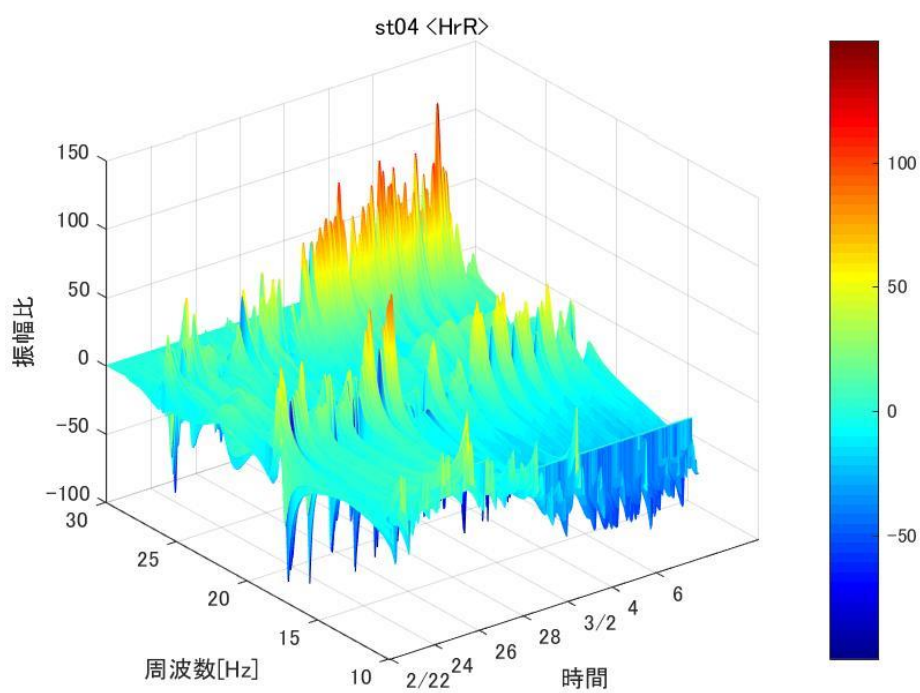
目次

付録 1. 各観測点—各伝達関数成分の各周波数における振幅の時間変化.....	48
観測点 4	49
観測点 5	52
観測点 6	55
観測点 7	58
観測点 8	61
観測点 9	64
観測点 10	67
観測点 11	70
付録 2. 空気注入の影響が大きい周波数とその振幅変化.....	73
観測点 4	74
観測点 5	78
観測点 6	82
観測点 7	86
観測点 8	91
観測点 9	94
観測点 10	98
観測点 11	102

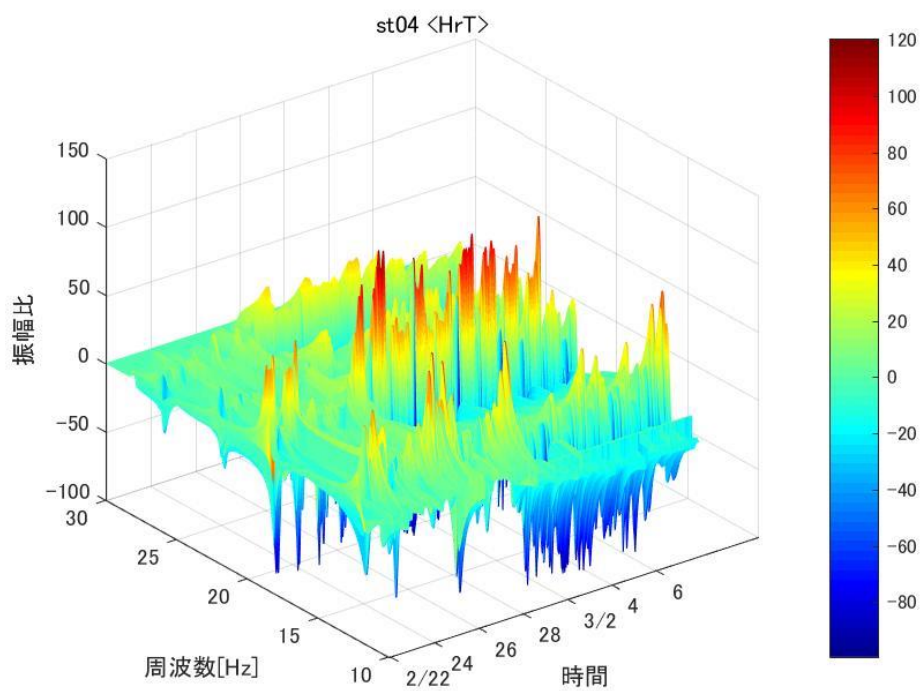
付録 1. 各観測点—各伝達関数成分の各周波数における振幅の時間変化

観測点 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 および 11 の伝達関数 6 成分の各周波数の振幅変化を示す。図の x 軸は観測開始(2011 年 2 月 22 日)からの時間, y 軸は周波数, z 軸とカラーバーは振幅比を表す。

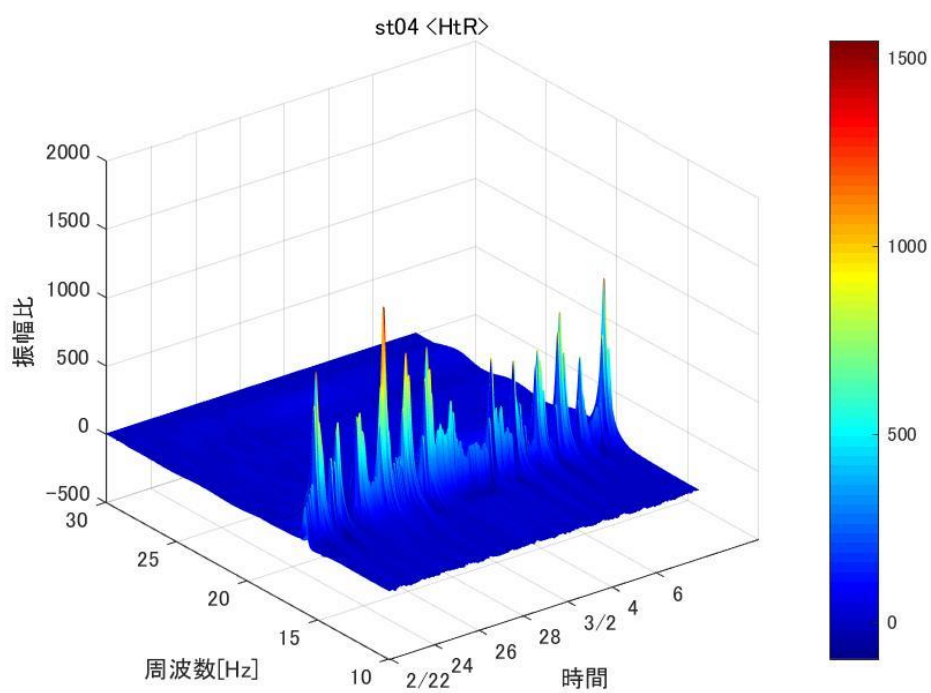
・ 付録図 1-1～付録図 1-6	観測点 4
・ 付録図 1-7～付録図 1-12	観測点 5
・ 付録図 1-13～付録図 1-18	観測点 6
・ 付録図 1-19～付録図 1-24	観測点 7
・ 付録図 1-25～付録図 1-30	観測点 8
・ 付録図 1-31～付録図 1-36	観測点 9
・ 付録図 1-37～付録図 1-42	観測点 10
・ 付録図 1-43～付録図 1-48	観測点 11



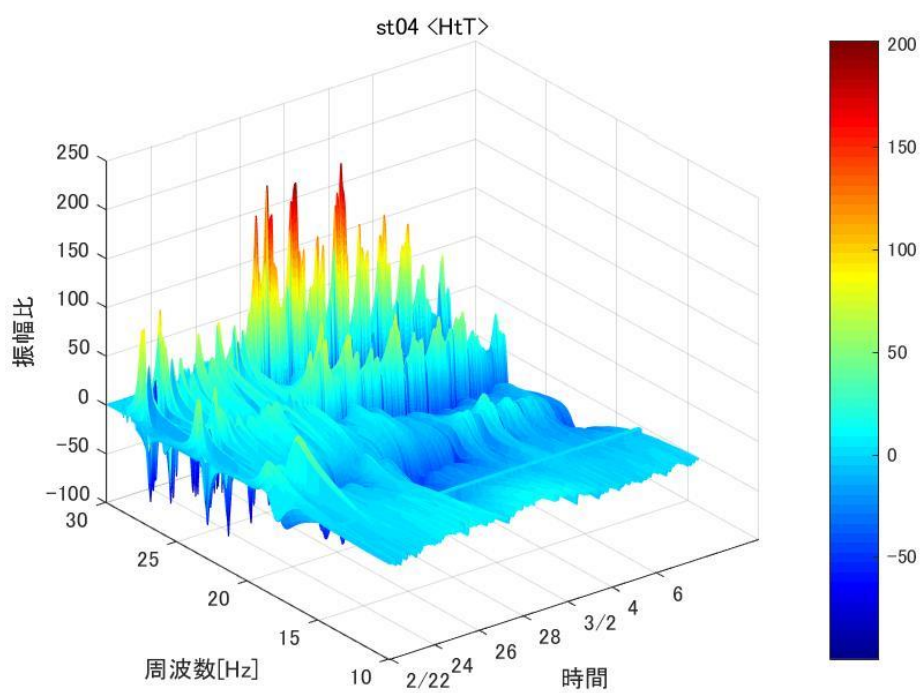
付録図 1-1 観測点 4— H_{rR} の各周波数における振幅変化



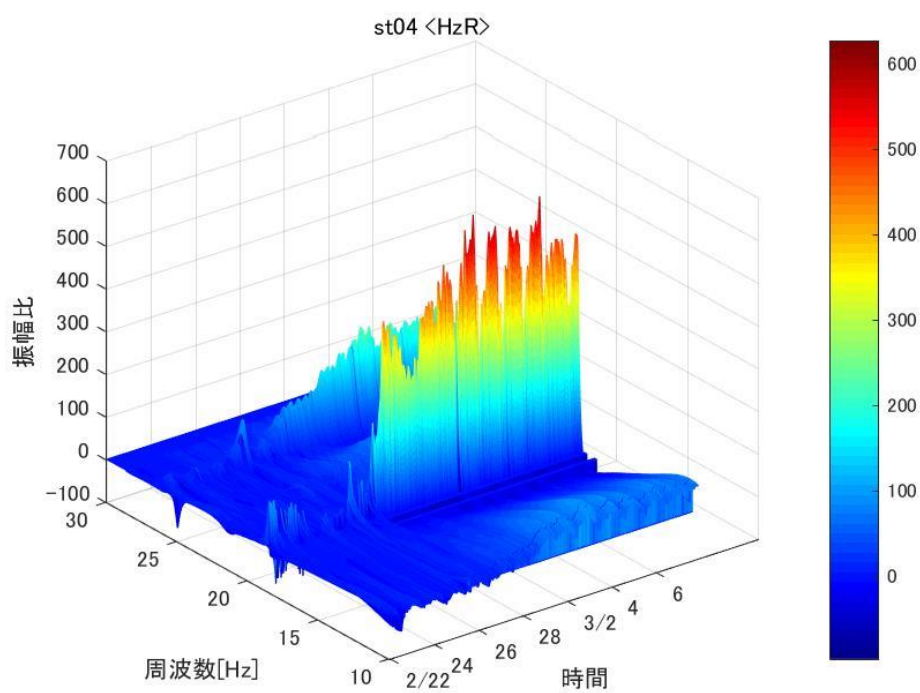
付録図 1-2 観測点 4— H_{rT} の各周波数における振幅変化



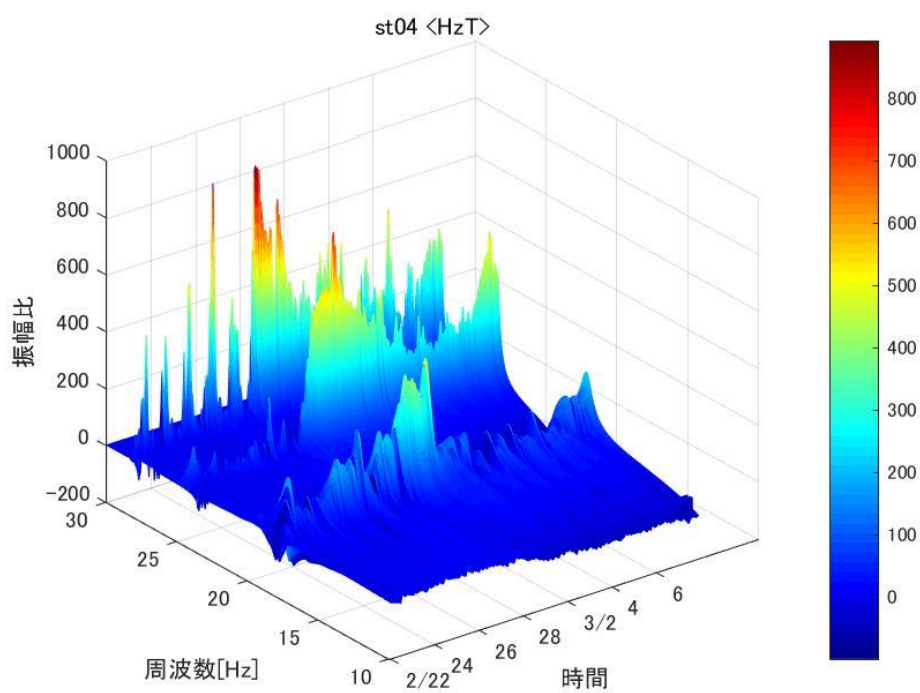
付録図 1-3 観測点 4— H_{tR} の各周波数における振幅変化



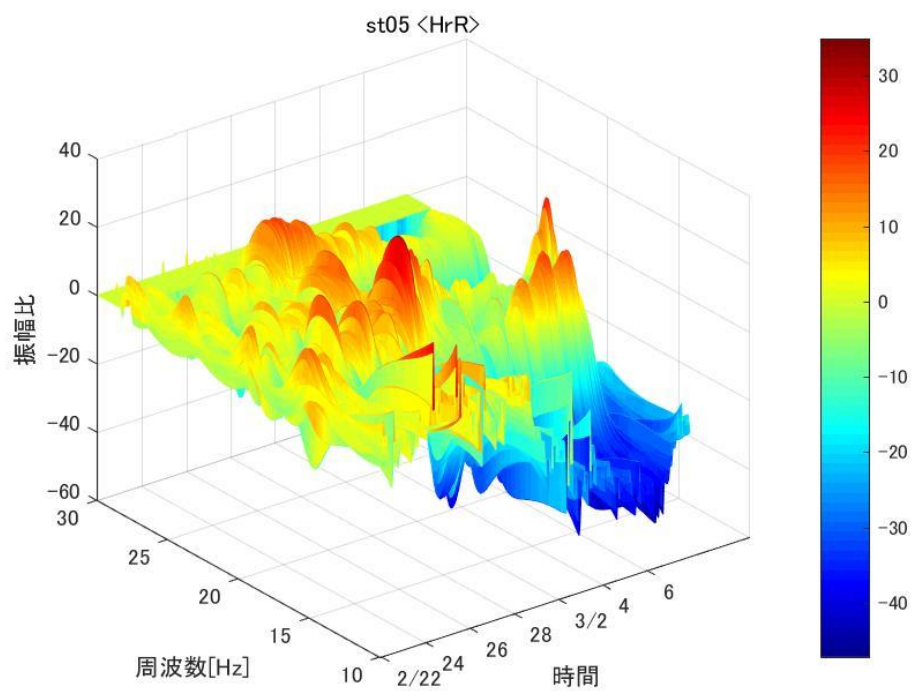
付録図 1-4 観測点 4— H_{tT} の各周波数における振幅変化



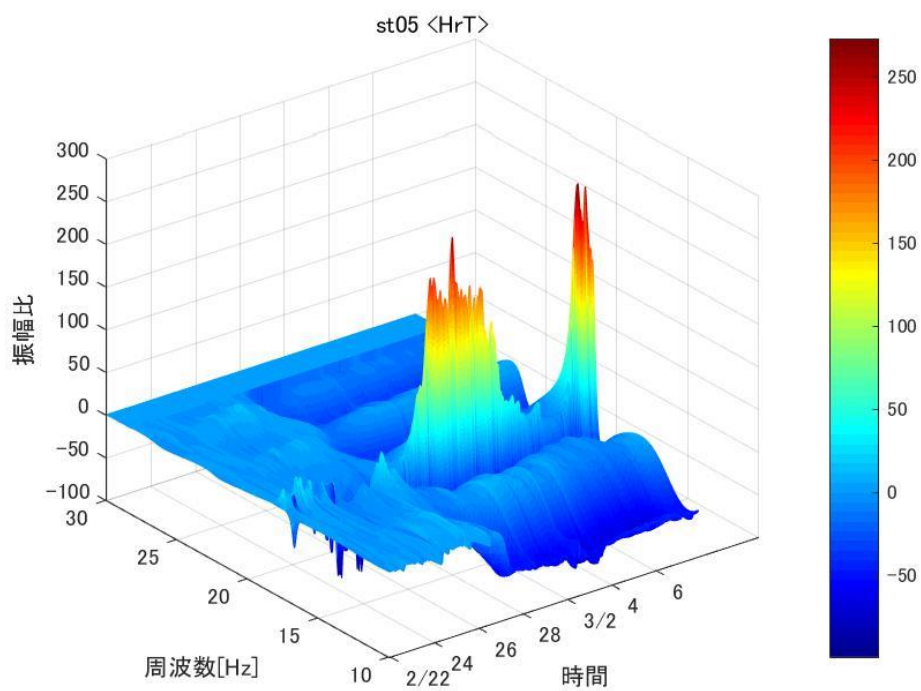
付録図 1-5 観測点 4— H_{zR} の各周波数における振幅変化



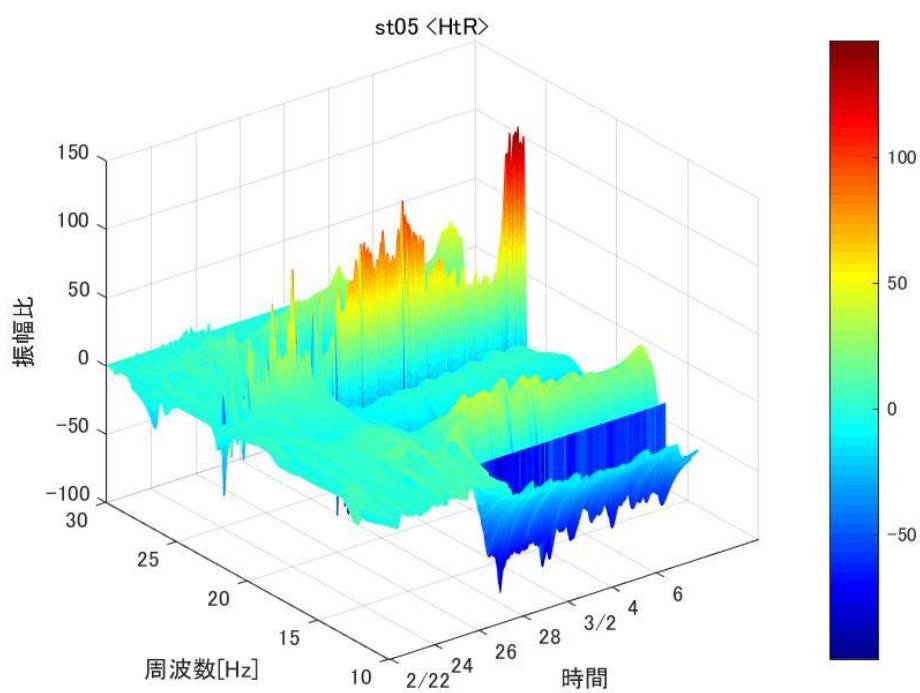
付録図 1-6 観測点 4— H_{zT} の各周波数における振幅変化



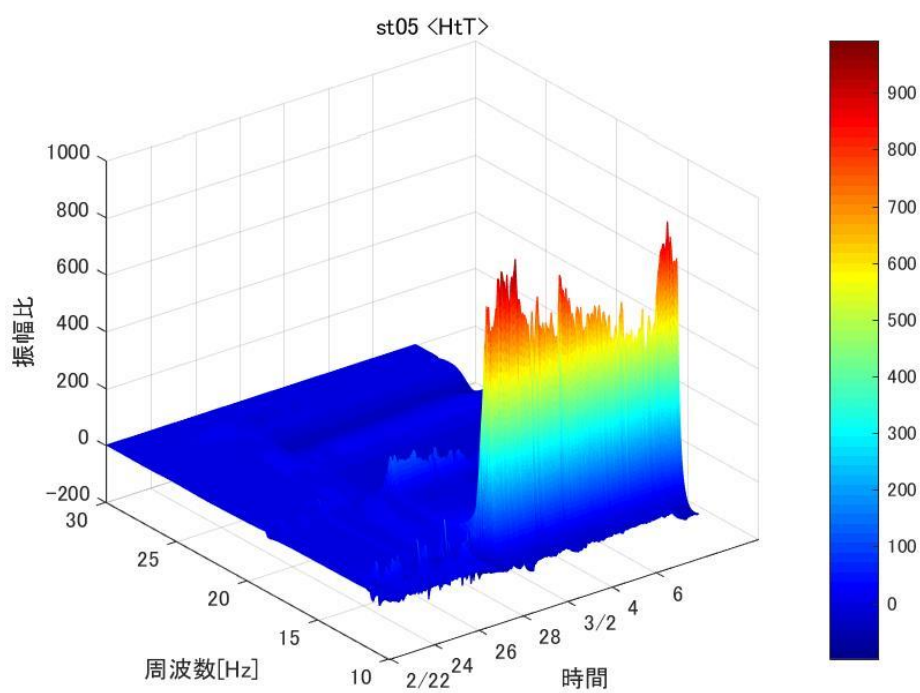
付録図 1-7 観測点 5— H_{rR} の各周波数における振幅変化



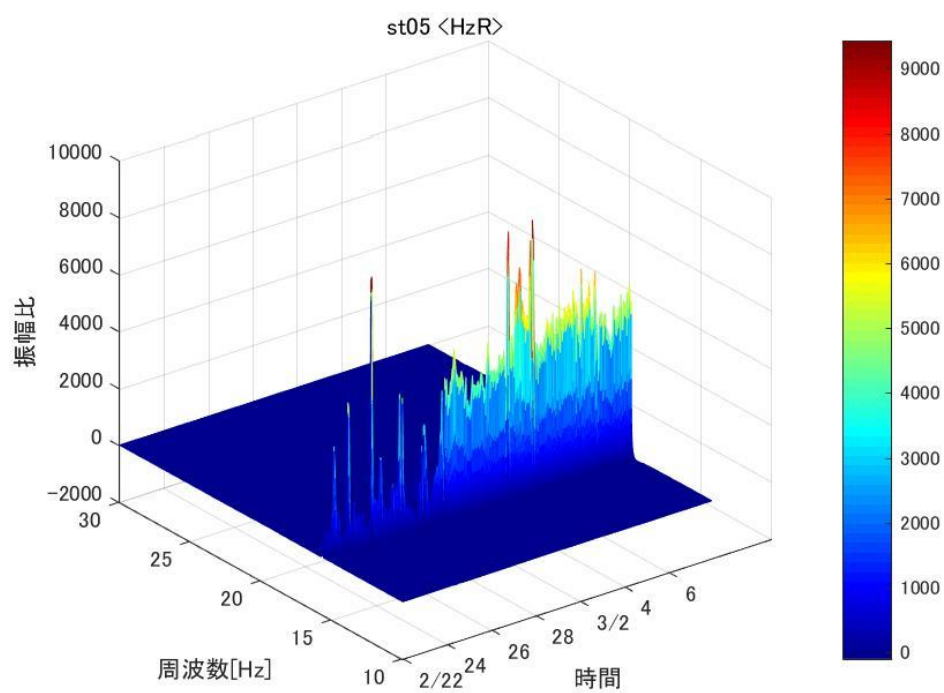
付録図 1-8 観測点 5— H_{rT} の各周波数における振幅変化



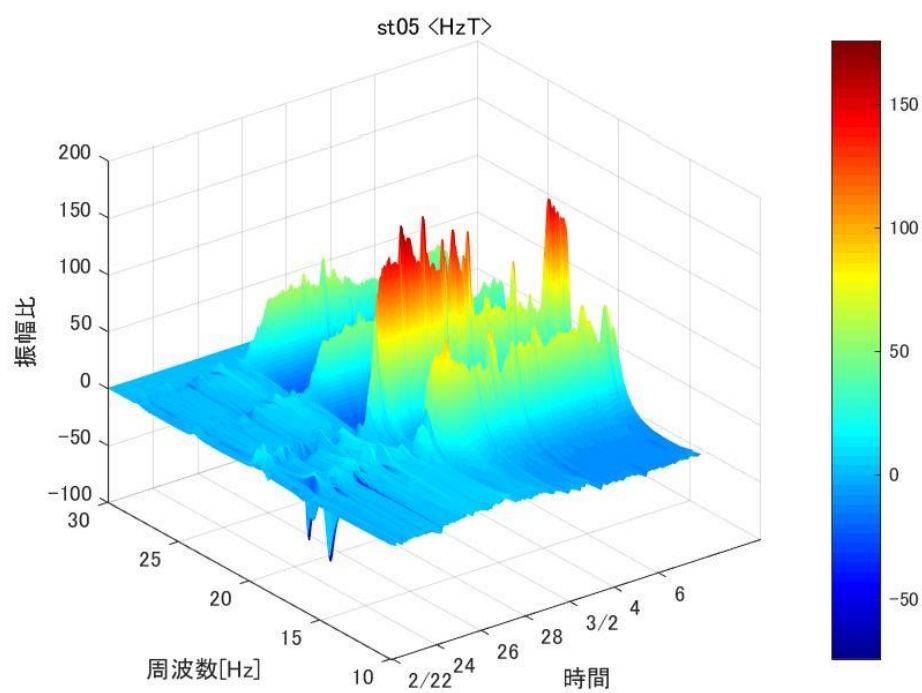
付録図 1-9 観測点 5— H_{tR} の各周波数における振幅変化



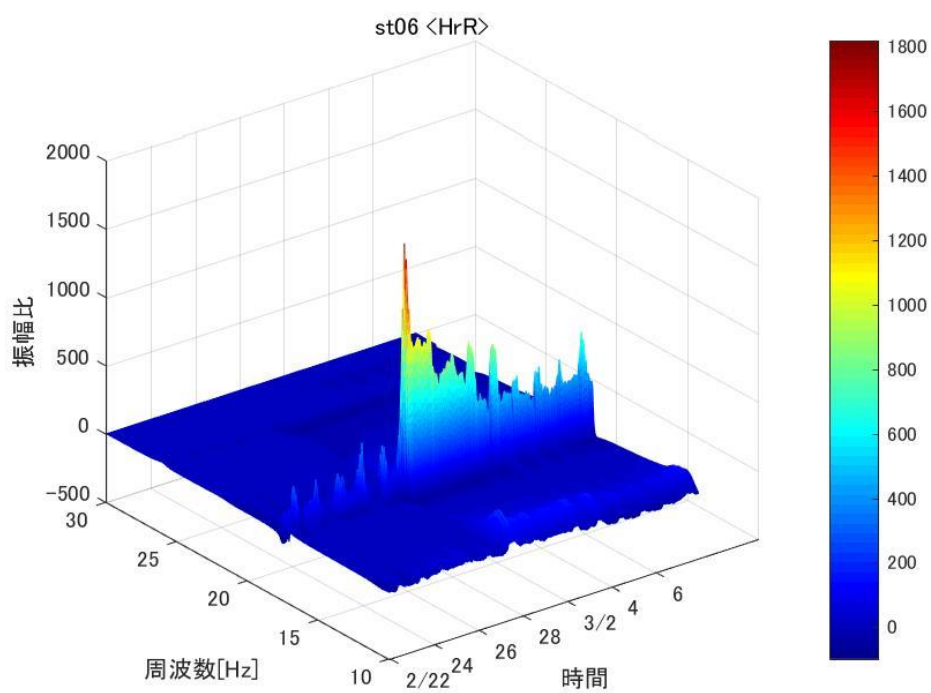
付録図 1-10 観測点 5— H_{tT} の各周波数における振幅変化



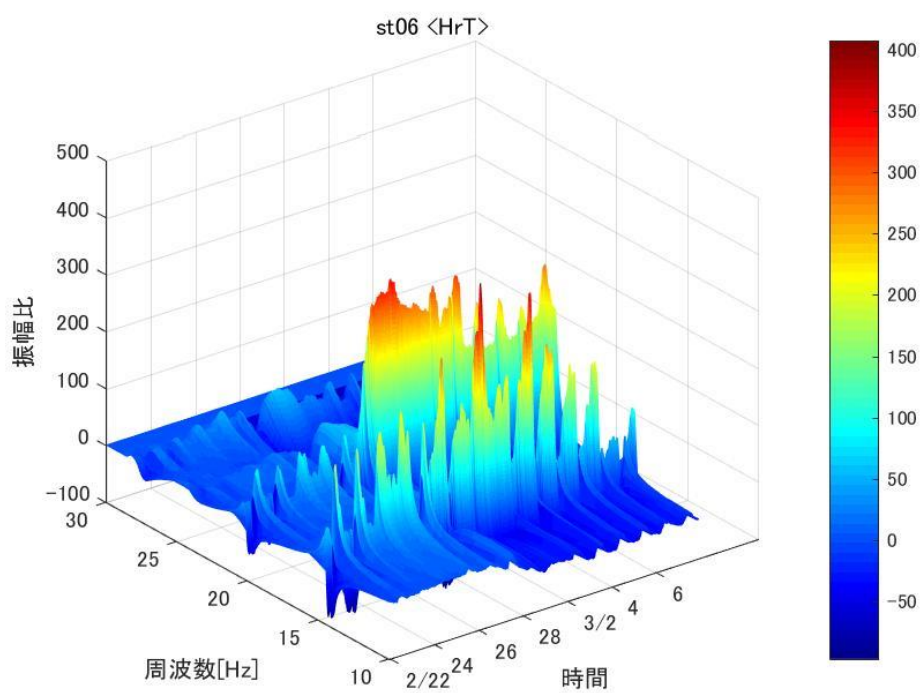
付録図 1-11 観測点 5— H_{zR} の各周波数における振幅変化



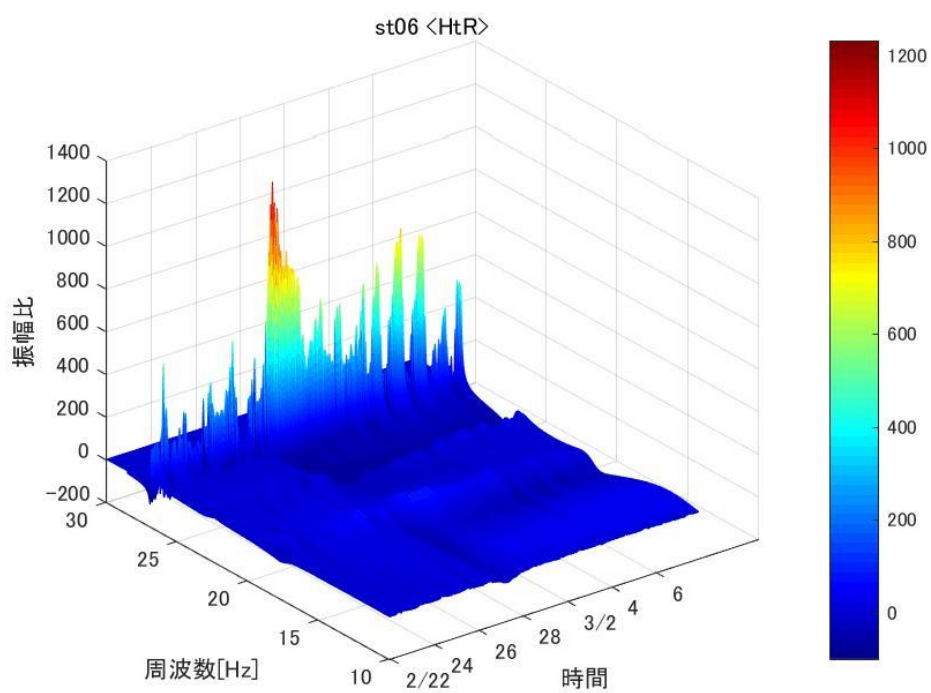
付録図 1-12 観測点 5— H_{zT} の各周波数における振幅変化



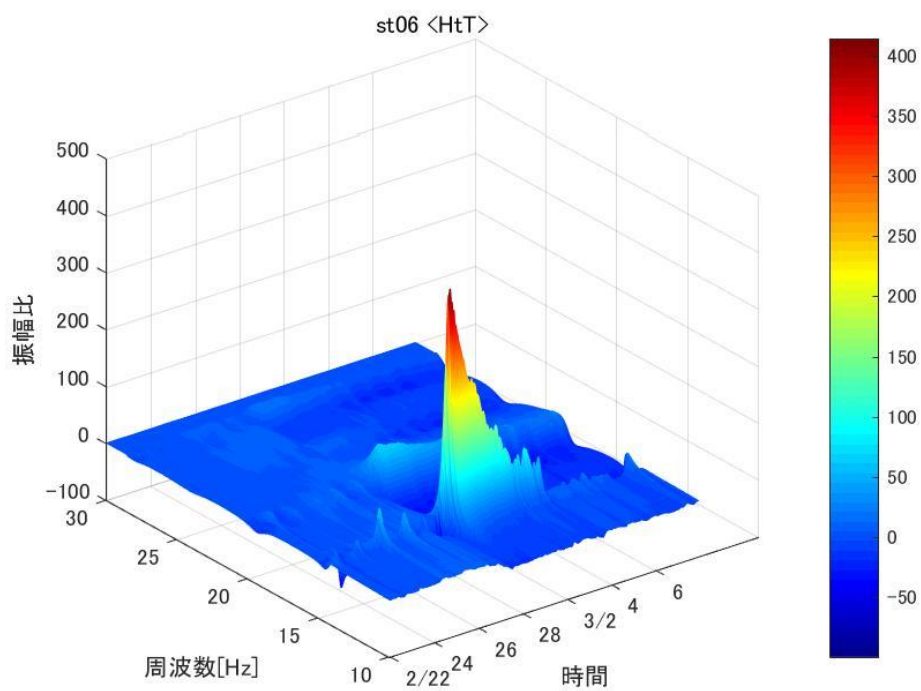
付録図 1-13 観測点 6— H_{rR} の各周波数における振幅変化



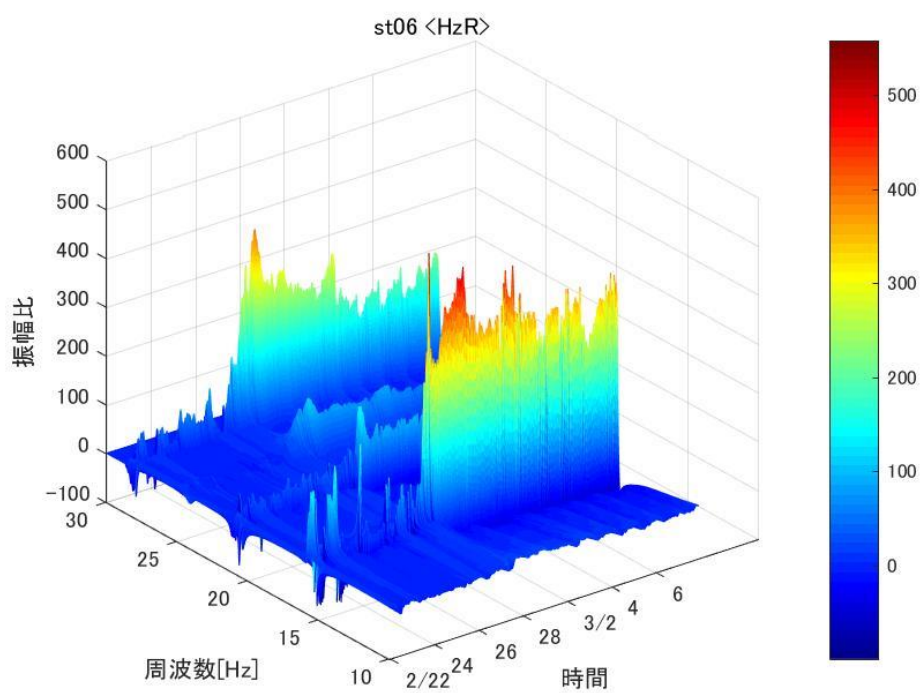
付録図 1-14 観測点 6— H_{rT} の各周波数における振幅変化



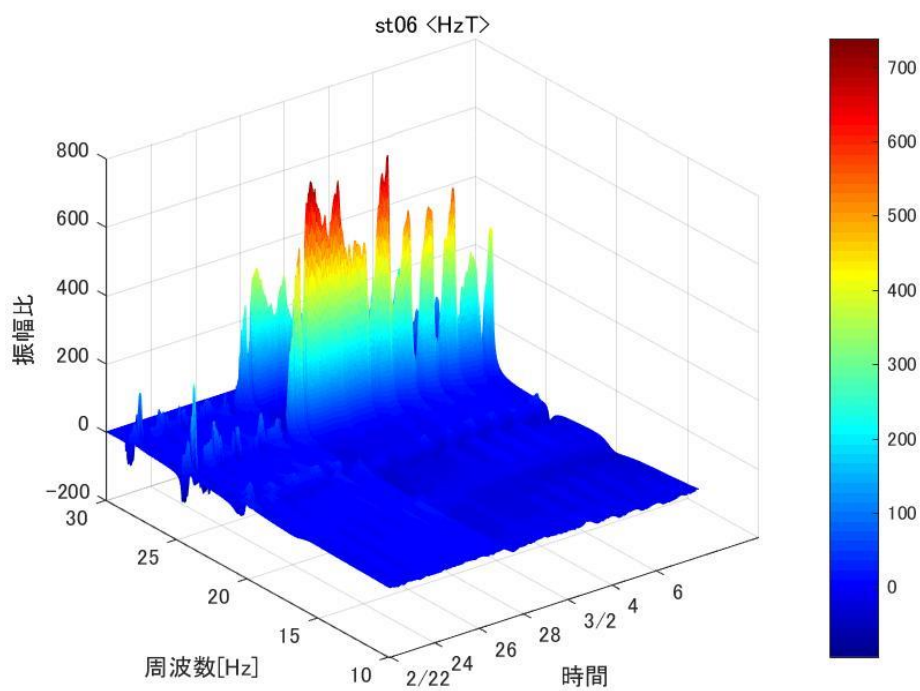
付録図 1-15 観測点 6— H_{tR} の各周波数における振幅変化



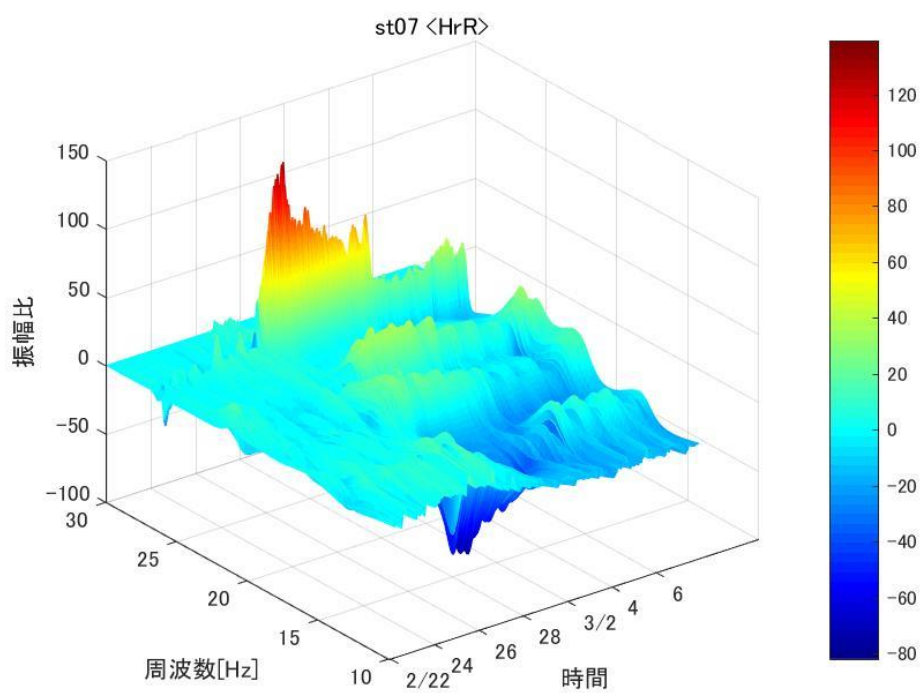
付録図 1-16 観測点 6— H_{tT} の各周波数における振幅変化



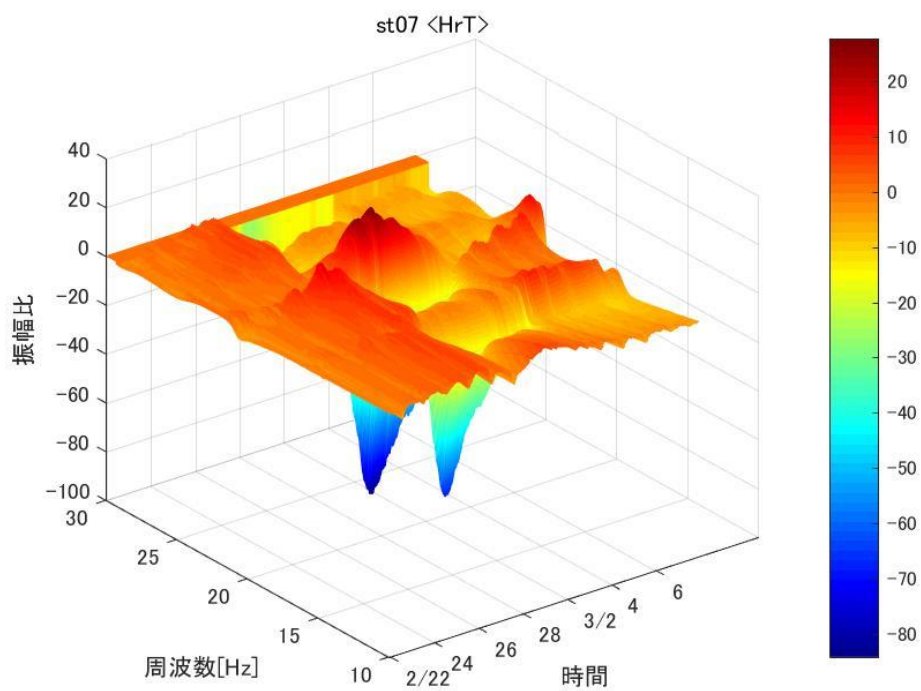
付録図 1-17 観測点 6— H_{zR} の各周波数における振幅変化



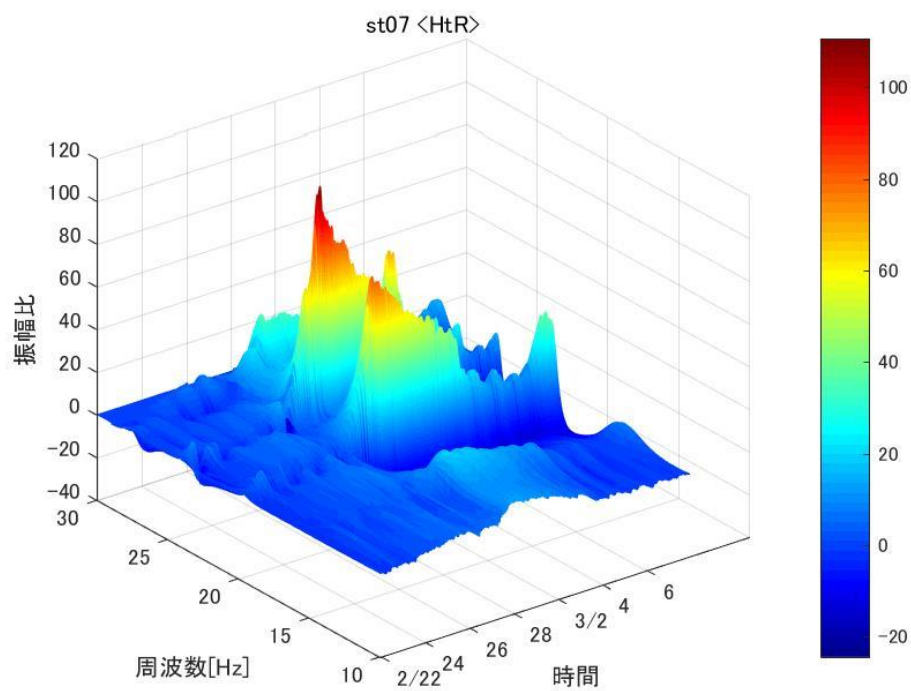
付録図 1-18 観測点 6— H_{zT} の各周波数における振幅変化



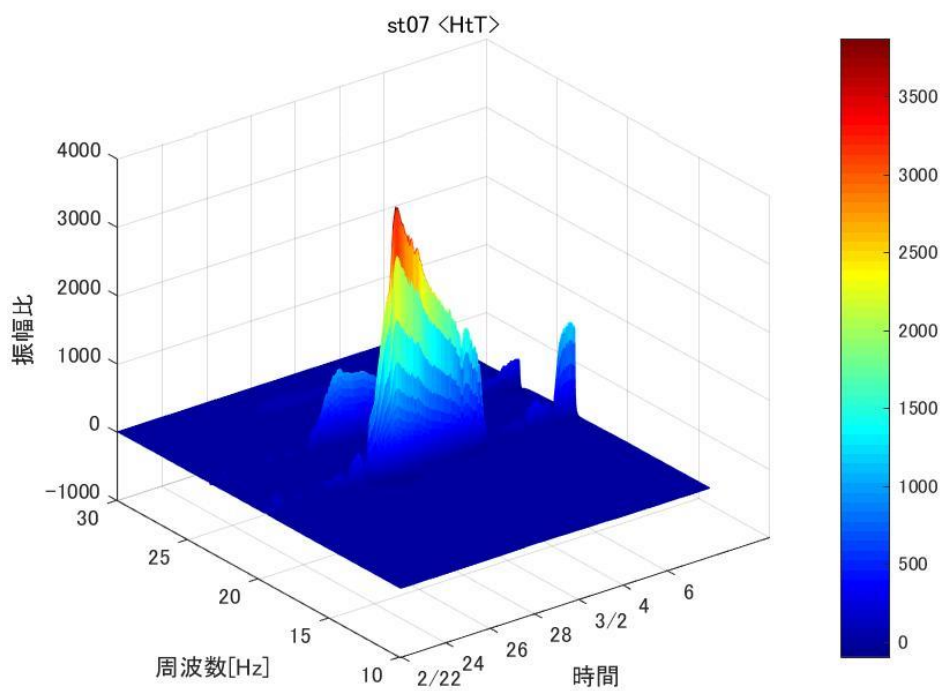
付録図 1-19 観測点 7— H_{R} の各周波数における振幅変化



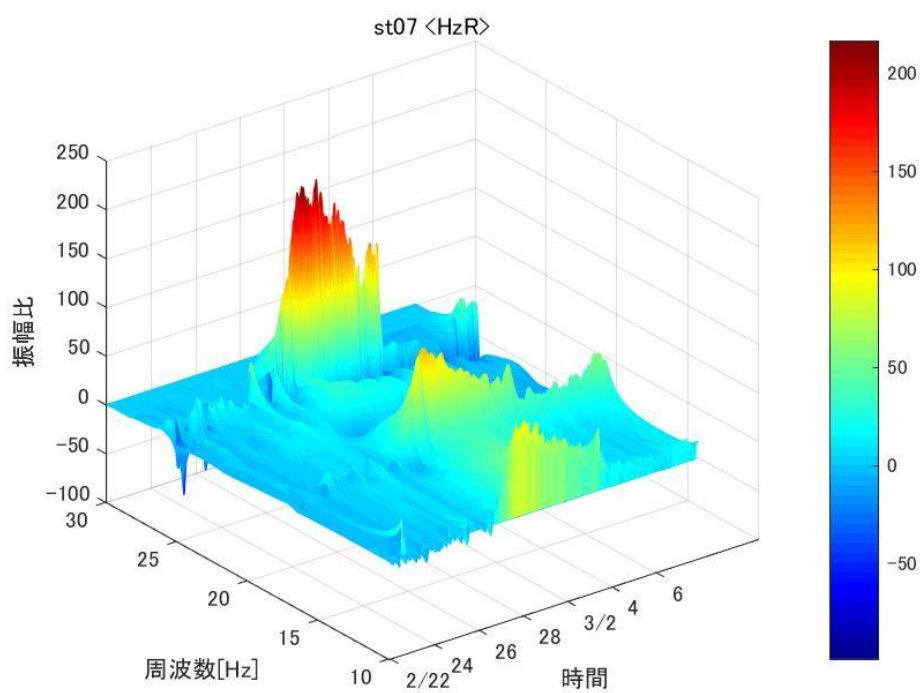
付録図 1-20 観測点 7— H_{T} の各周波数における振幅変化



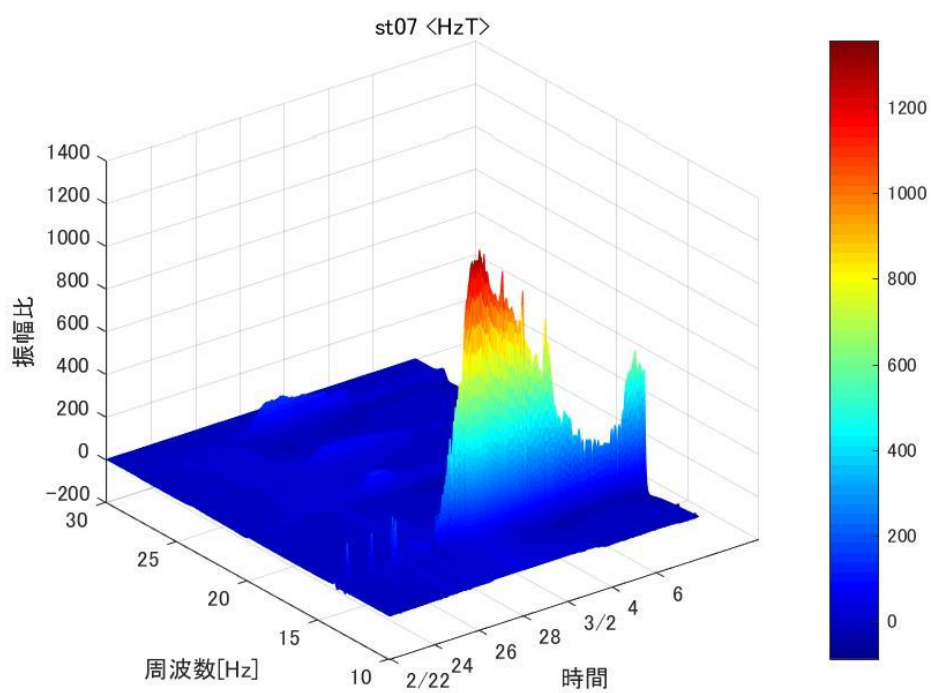
付録図 1-21 観測点 7— H_{tR} の各周波数における振幅変化



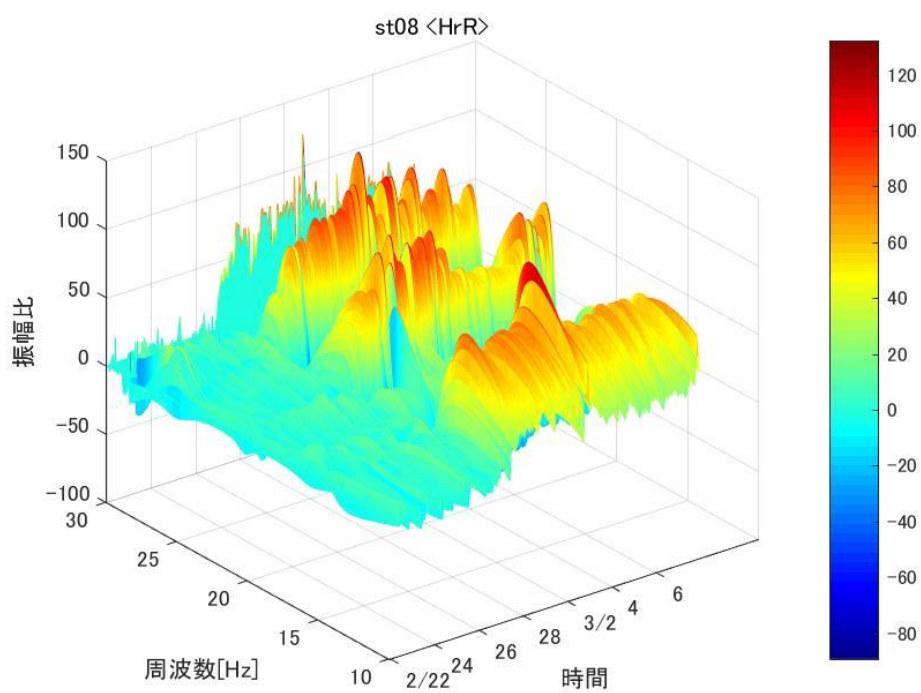
付録図 1-22 観測点 7— H_{tT} の各周波数における振幅変化



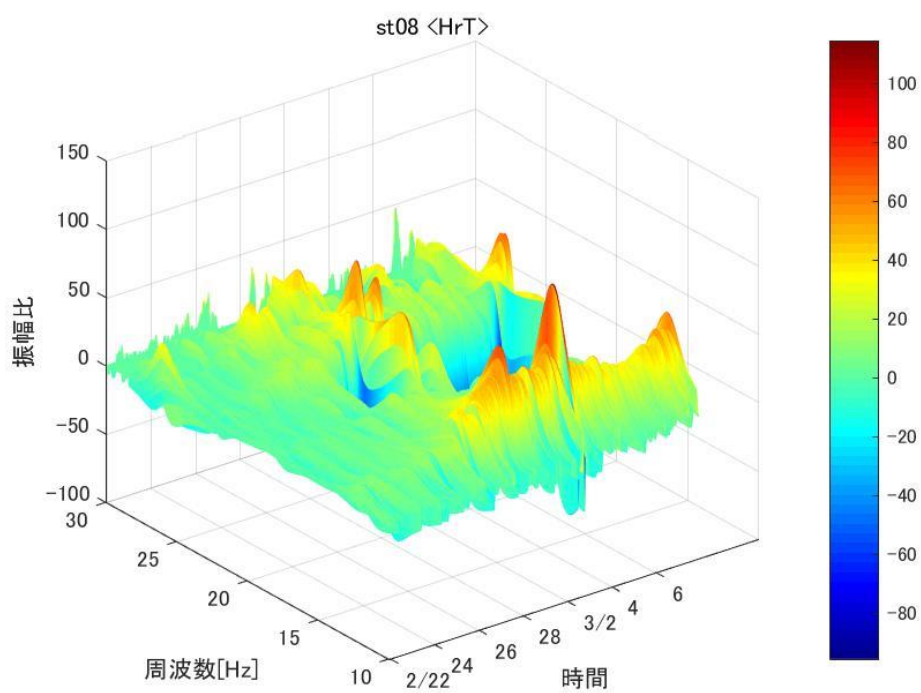
付録図 1-23 観測点 7— H_{zR} の各周波数における振幅変化



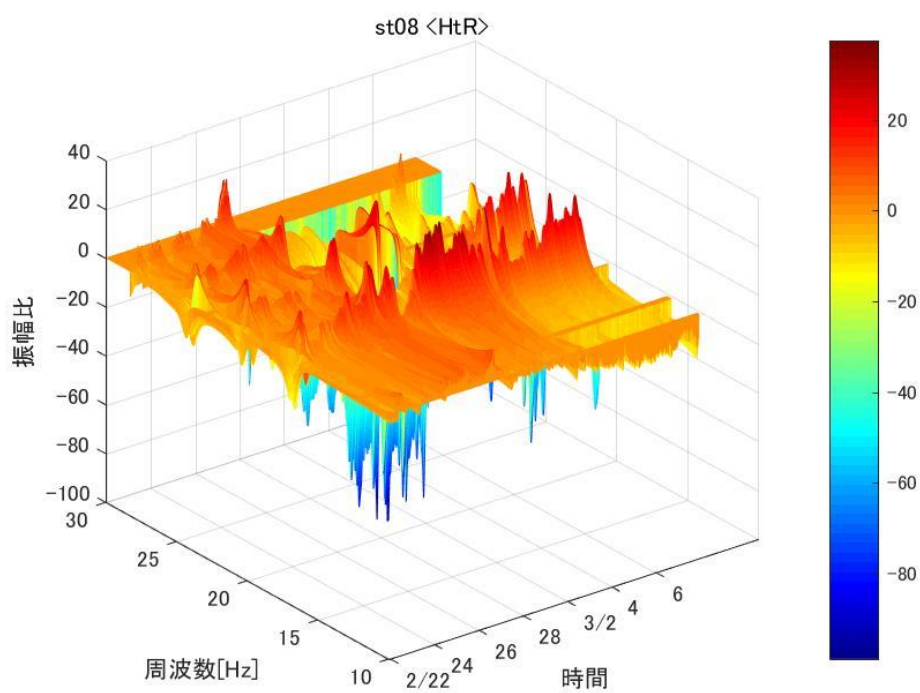
付録図 1-24 観測点 7— H_{zT} の各周波数における振幅変化



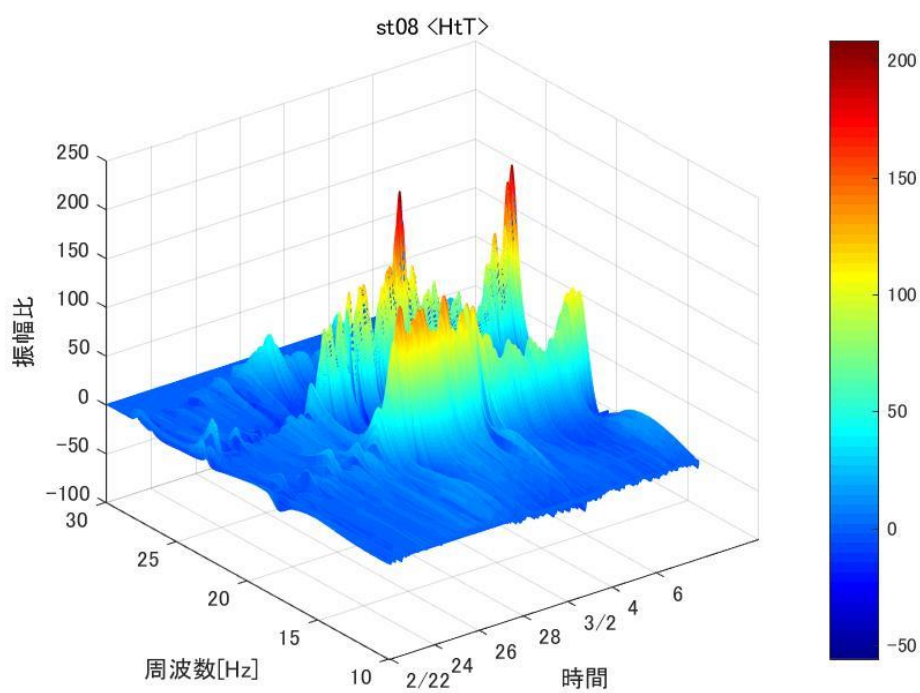
付録図 1-25 観測点 8— H_{R} の各周波数における振幅変化



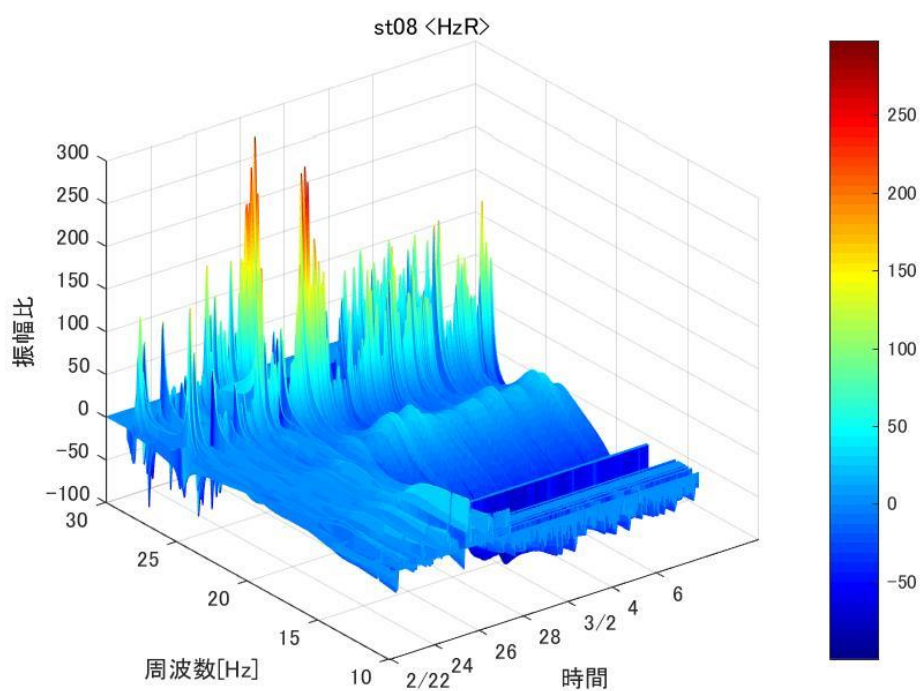
付録図 1-26 観測点 8— H_{T} の各周波数における振幅変化



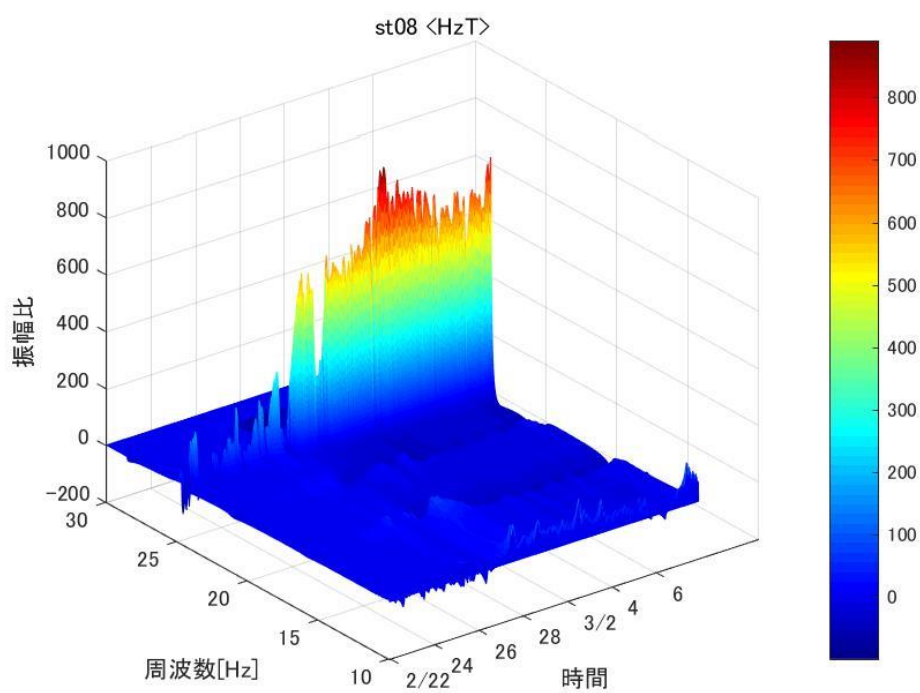
付録図 1-27 観測点 8— H_{tR} の各周波数における振幅変化



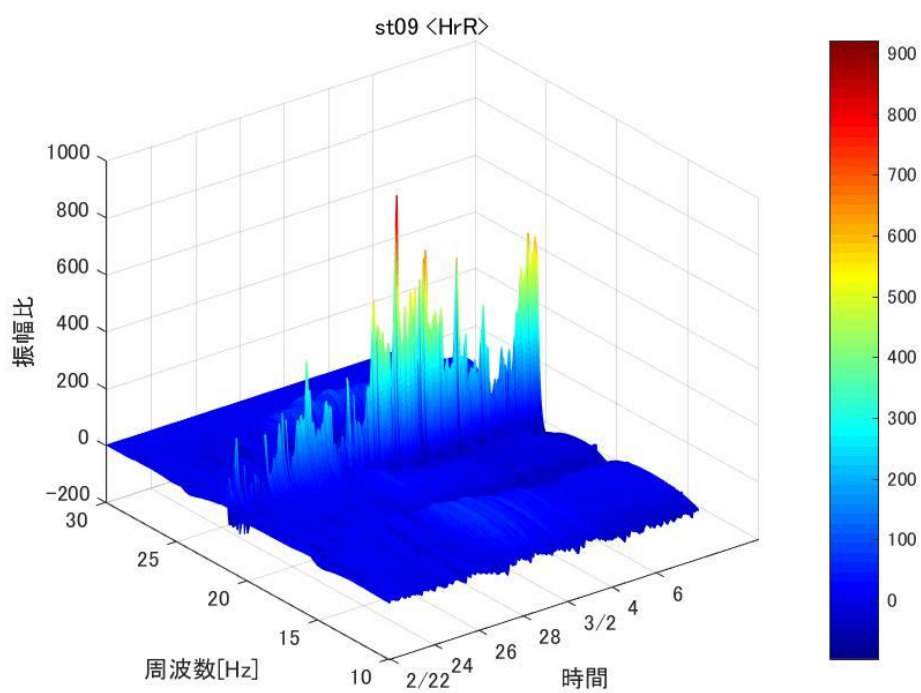
付録図 1-28 観測点 8— H_{tT} の各周波数における振幅変化



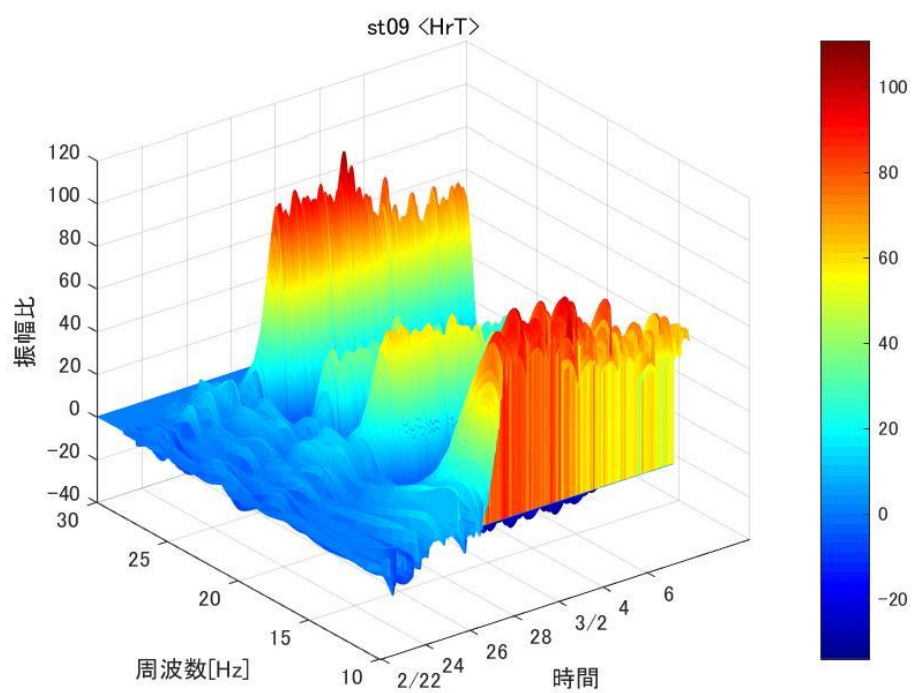
付録図 1-29 観測点 8— H_{zR} の各周波数における振幅変化



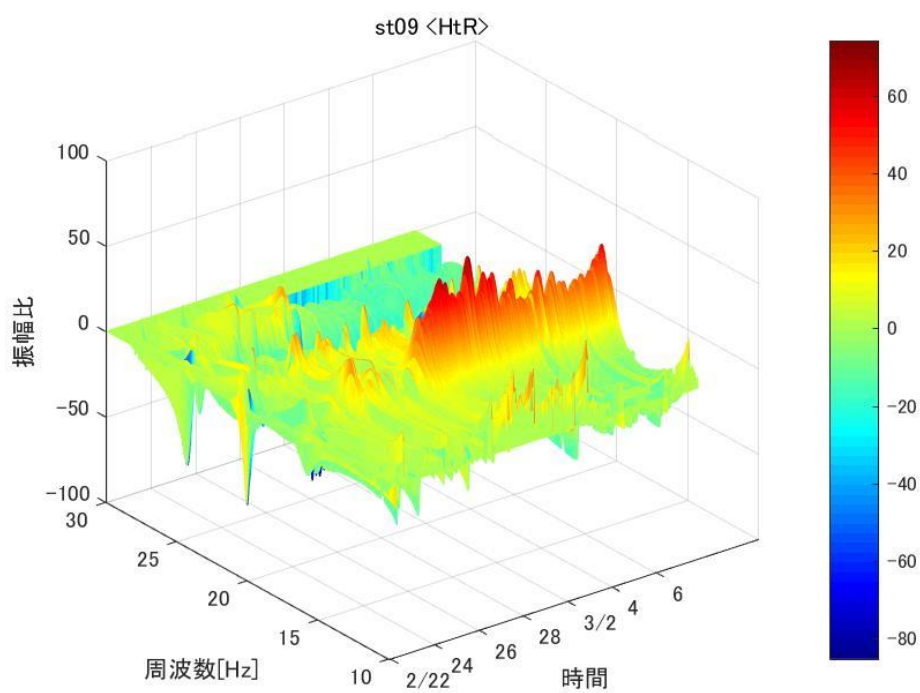
付録図 1-30 観測点 8— H_{zT} の各周波数における振幅変化



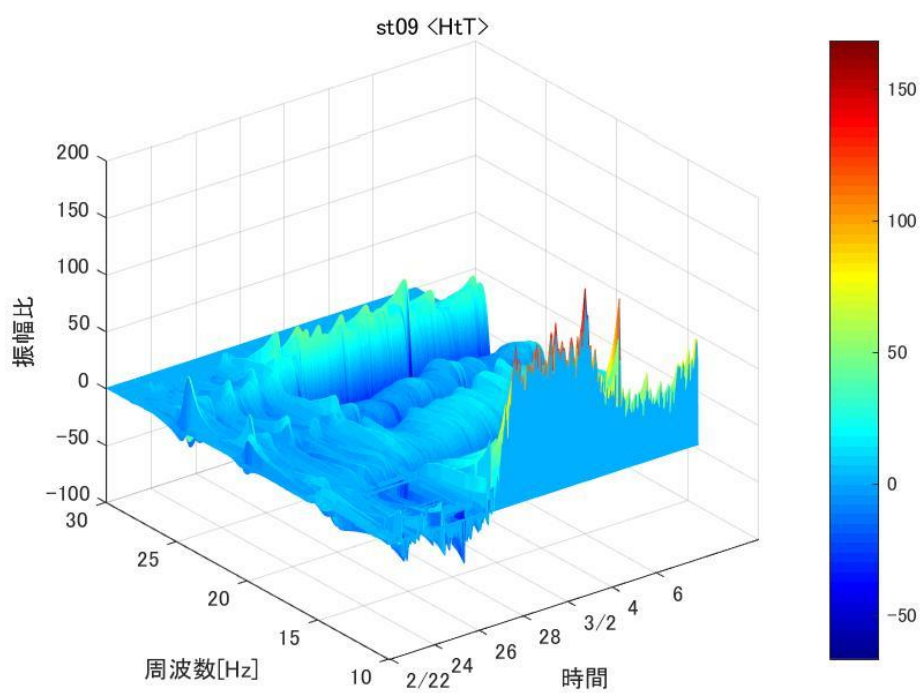
付録図 1-31 観測点 9— H_{rR} の各周波数における振幅変化



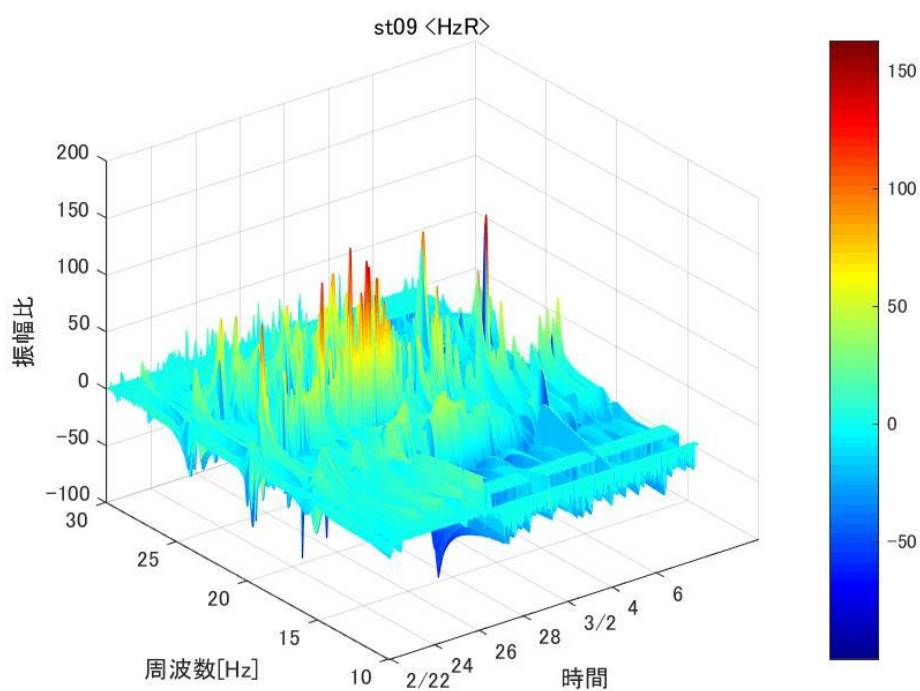
付録図 1-32 観測点 9— H_{rT} の各周波数における振幅変化



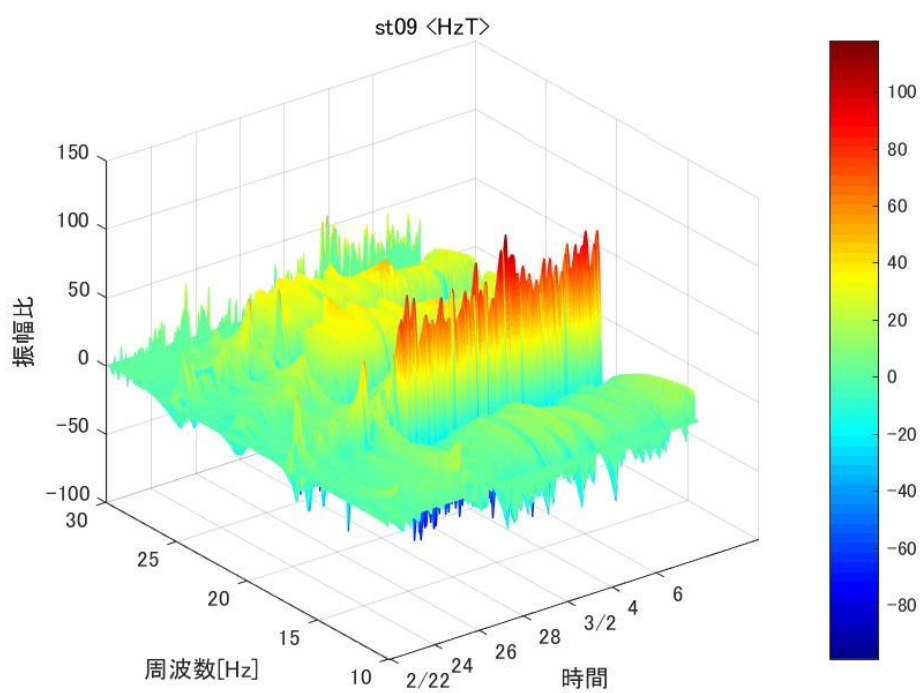
付録図 1-33 観測点 9— H_{tR} の各周波数における振幅変化



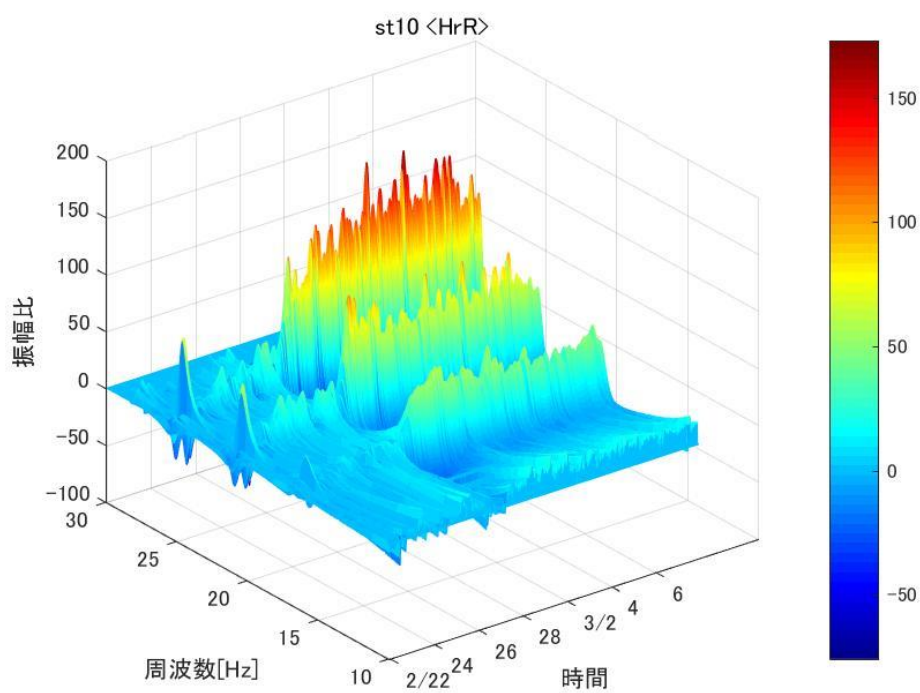
付録図 1-34 観測点 9— H_{tT} の各周波数における振幅変化



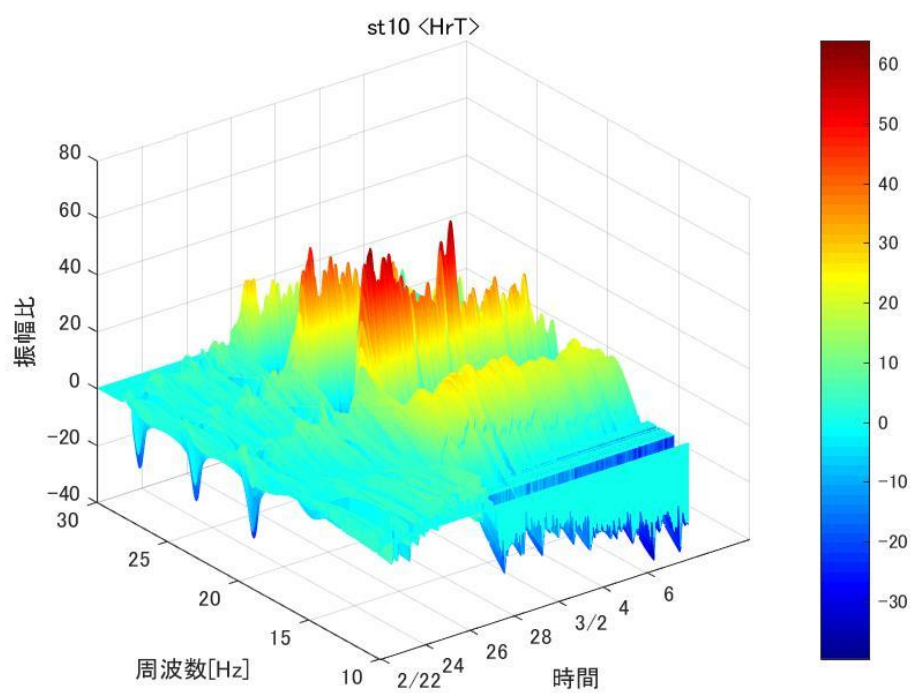
付録図 1-35 観測点 9— H_{zR} の各周波数における振幅変化



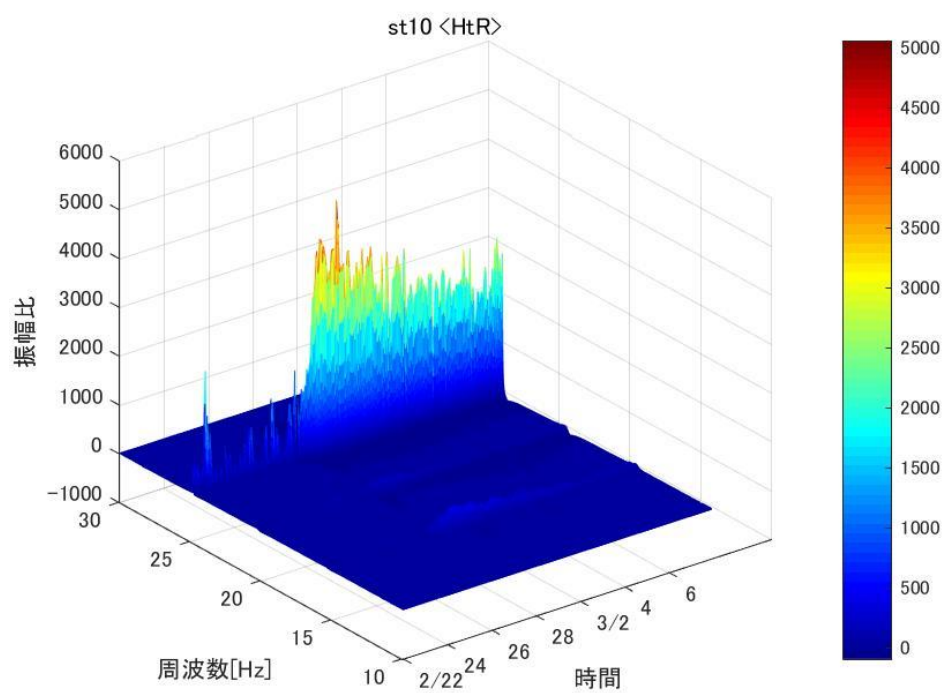
付録図 1-36 観測点 9— H_{zT} の各周波数における振幅変化



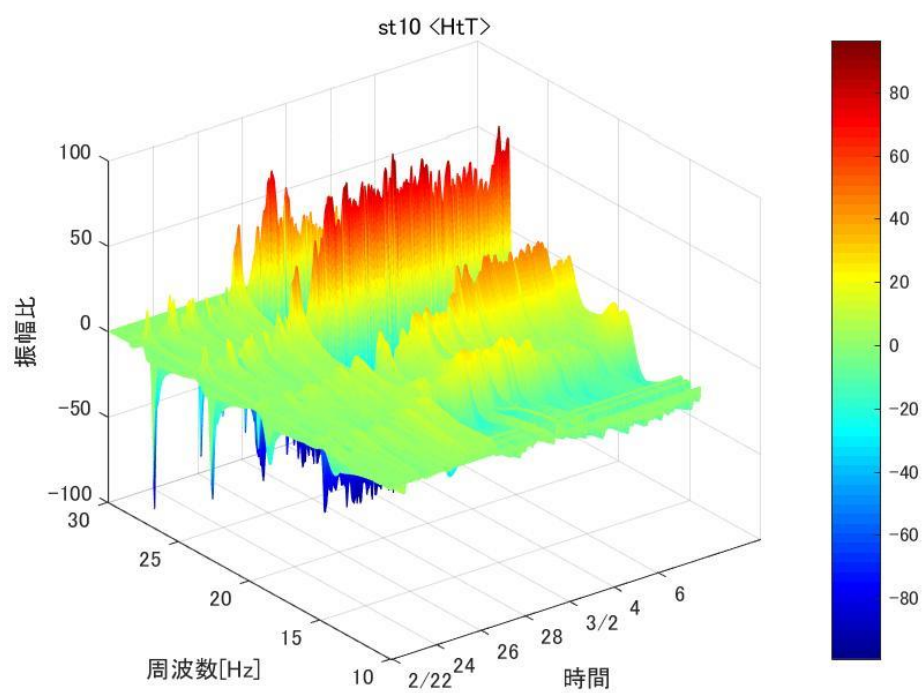
付録図 1-37 観測点 10— H_{R} の各周波数における振幅変化



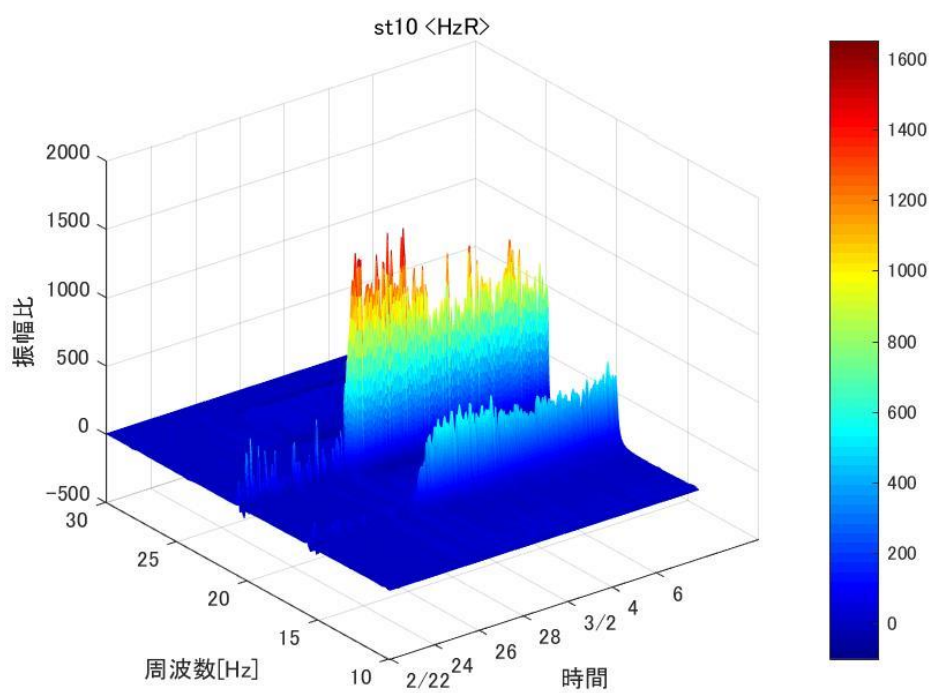
付録図 1-38 観測点 10— H_{T} の各周波数における振幅変化



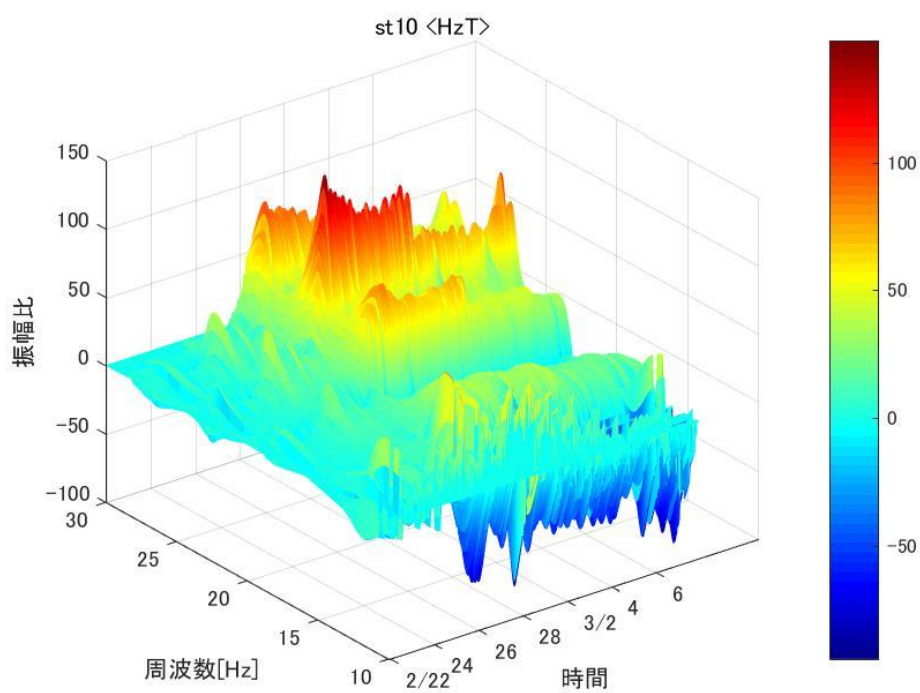
付録図 1-39 観測点 10— H_{tR} の各周波数における振幅変化



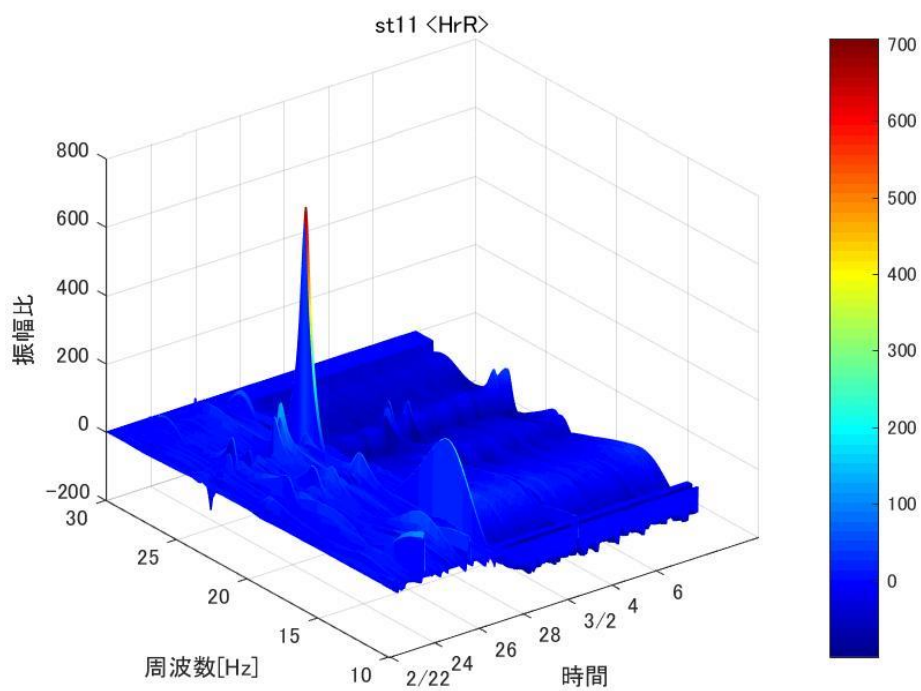
付録図 1-40 観測点 10— H_{tT} の各周波数における振幅変化



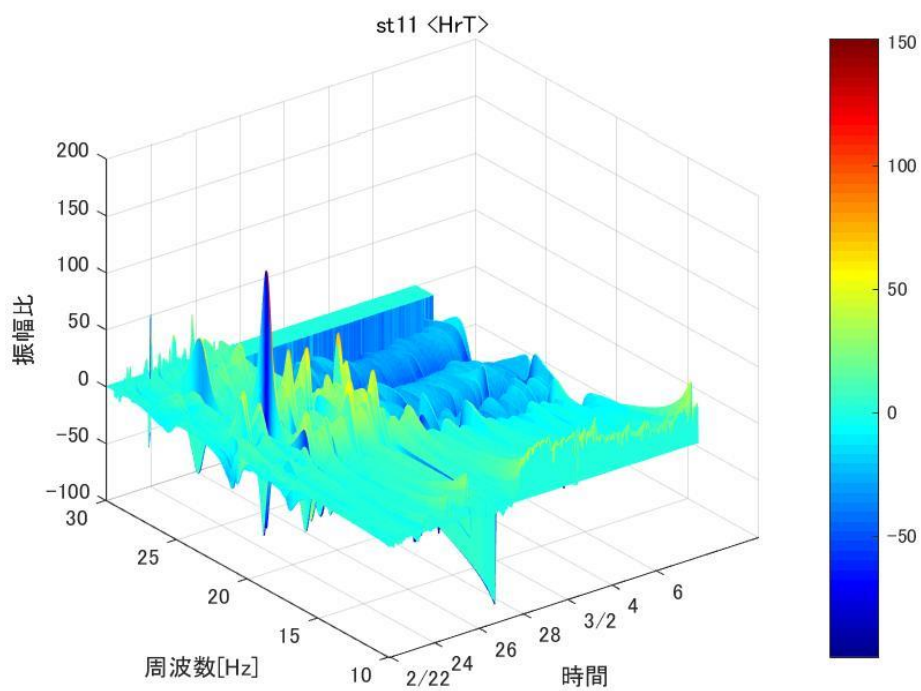
付録図 1-41 観測点 10— H_{zR} の各周波数における振幅変化



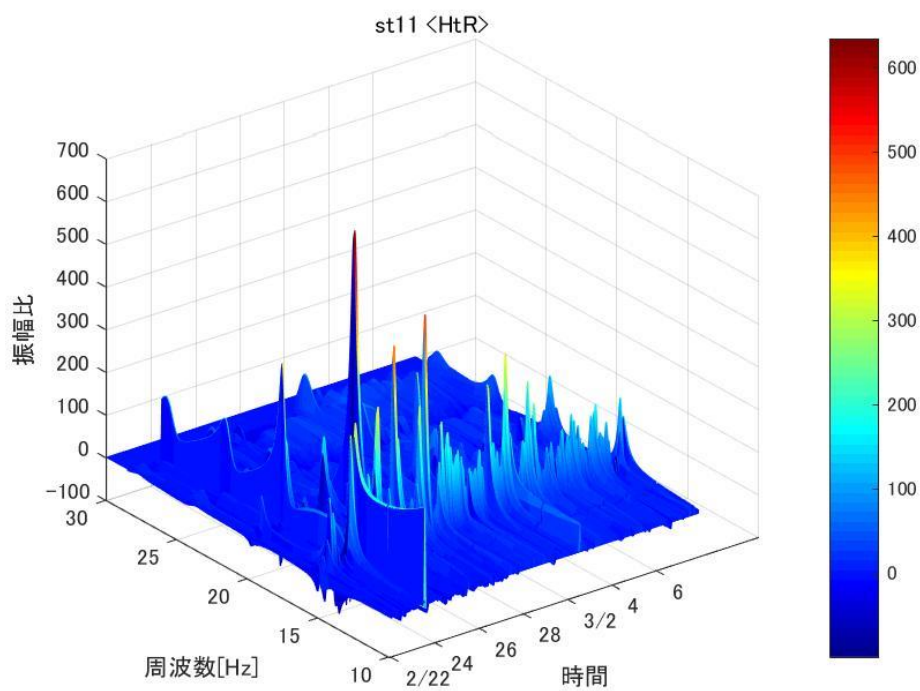
付録図 1-42 観測点 10— H_{zT} の各周波数における振幅変化



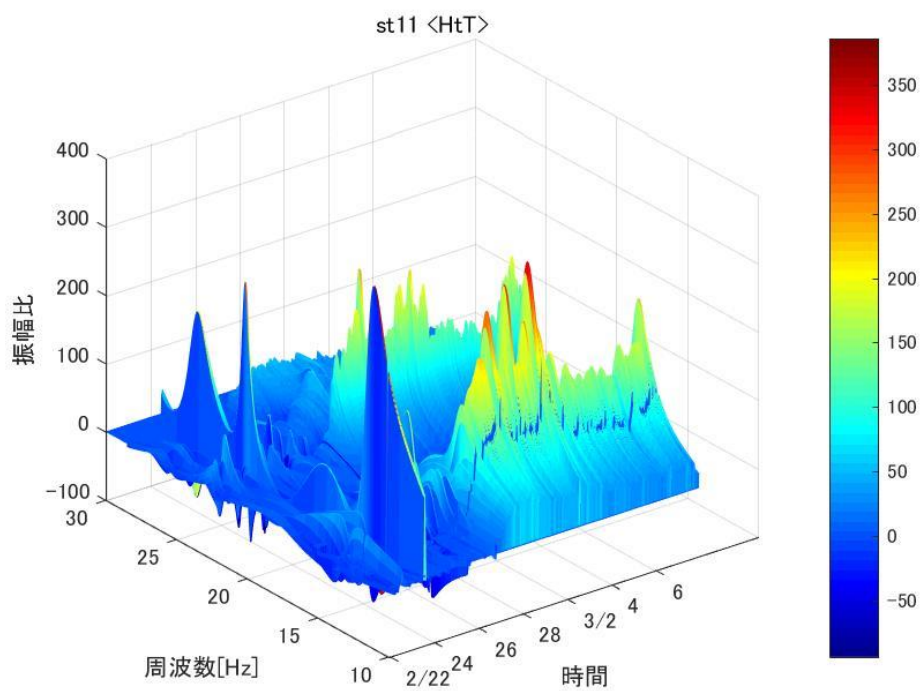
付録図 1-43 観測点 11— H_{rR} の各周波数における振幅変化



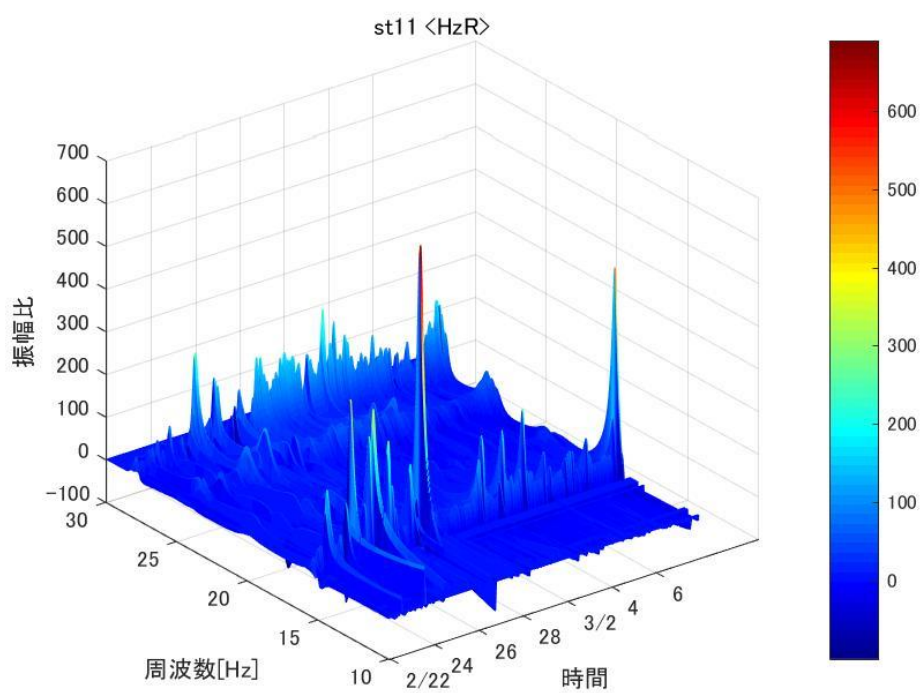
付録図 1-44 観測点 11— H_{rT} の各周波数における振幅変化



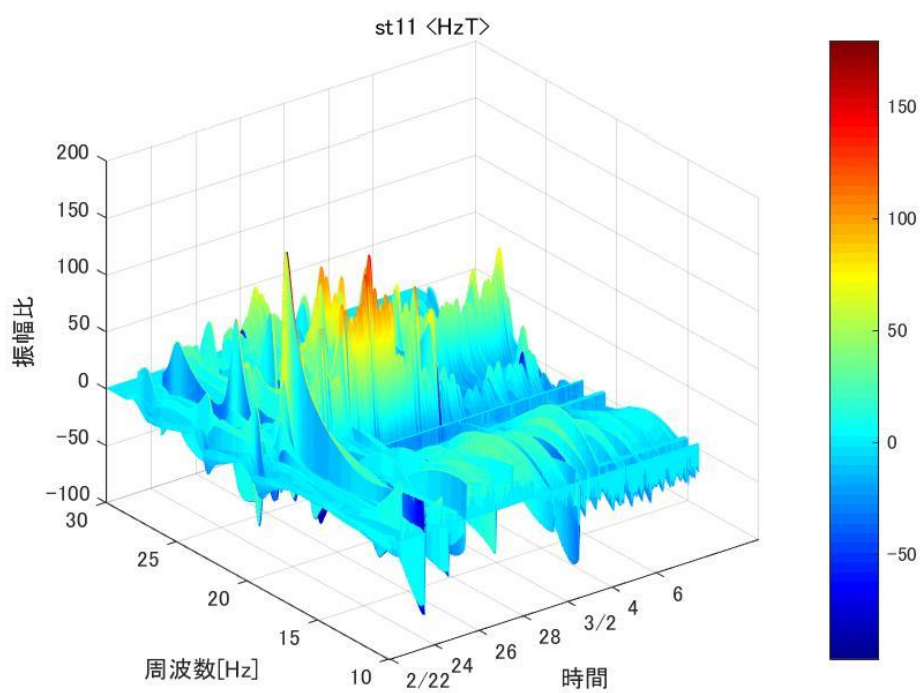
付録図 1-45 観測点 11— H_{tR} の各周波数における振幅変化



付録図 1-46 観測点 11— H_{tT} の各周波数における振幅変化



付録図 1-47 観測点 11— H_{zR} の各周波数における振幅変化



付録図 1-48 観測点 11— H_{zT} の各周波数における振幅変化

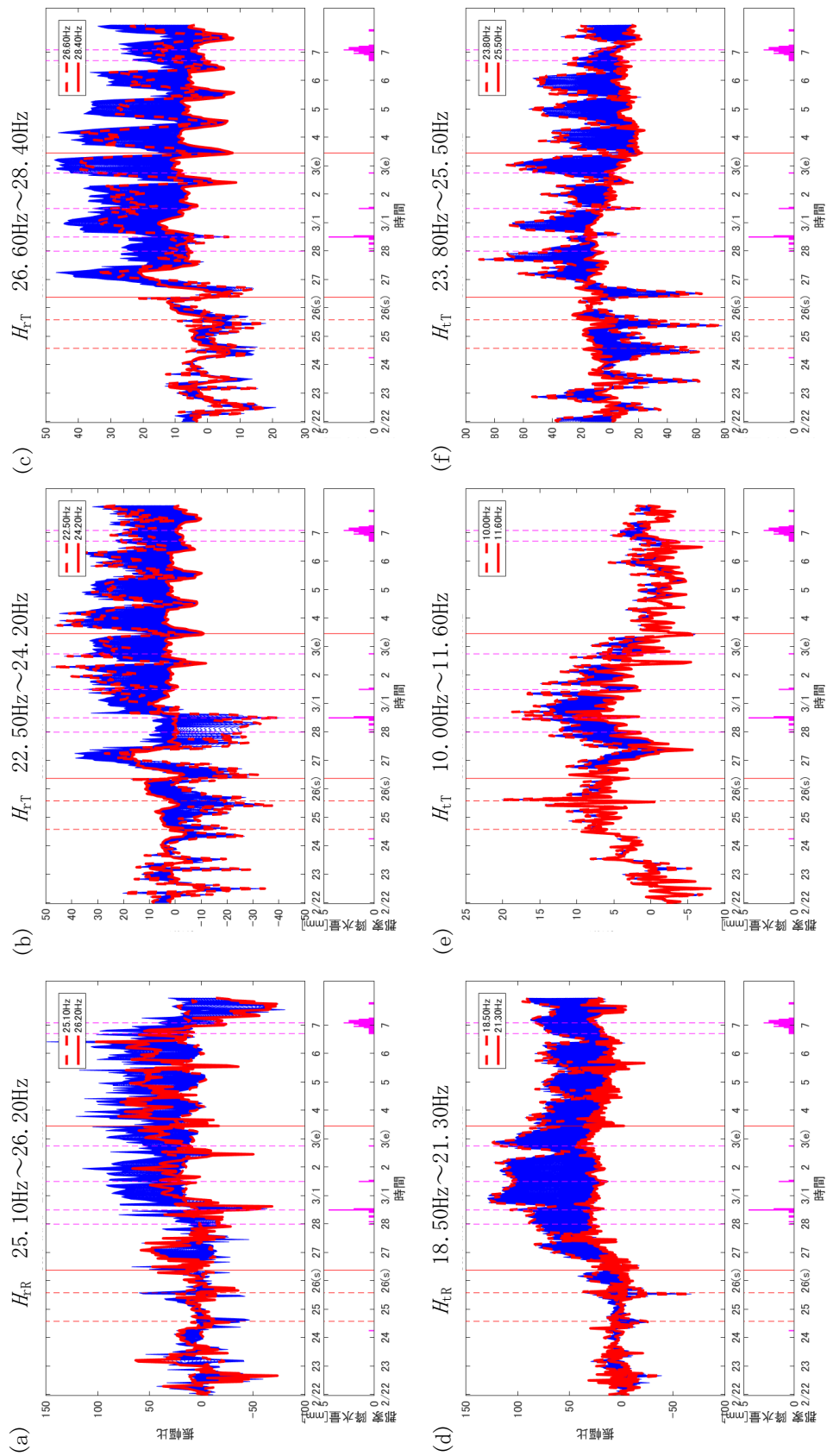
付録 2. 空気注入の影響が大きい周波数とその振幅変化

空気注入開始以降に振幅が増加し、かつ、降雨の影響が小さい周波数を示す。表には、該当する周波数を、そして、その周波数の振幅の時間変化を図に示す。図の x 軸は観測開始（2011 年 2 月 22 日）からの時間、上段の y 軸は振幅比、下段の y 軸は降水量を表す。

・ 付録表 2-1, 付録図 2-1	観測点 4
・ 付録表 2-2, 付録図 2-2	観測点 5
・ 付録表 2-3, 付録図 2-3.....	観測点 6
・ 付録表 2-4, 付録図 2-4.....	観測点 7
・ 付録表 2-5, 付録図 2-5.....	観測点 8
・ 付録表 2-6, 付録図 2-6.....	観測点 9
・ 付録表 2-7, 付録図 2-7.....	観測点 10
・ 付録表 2-8, 付録図 2-8.....	観測点 11

付録表 2-1. 観測点 4 の空気注入の影響が大きい周波数 [Hz]

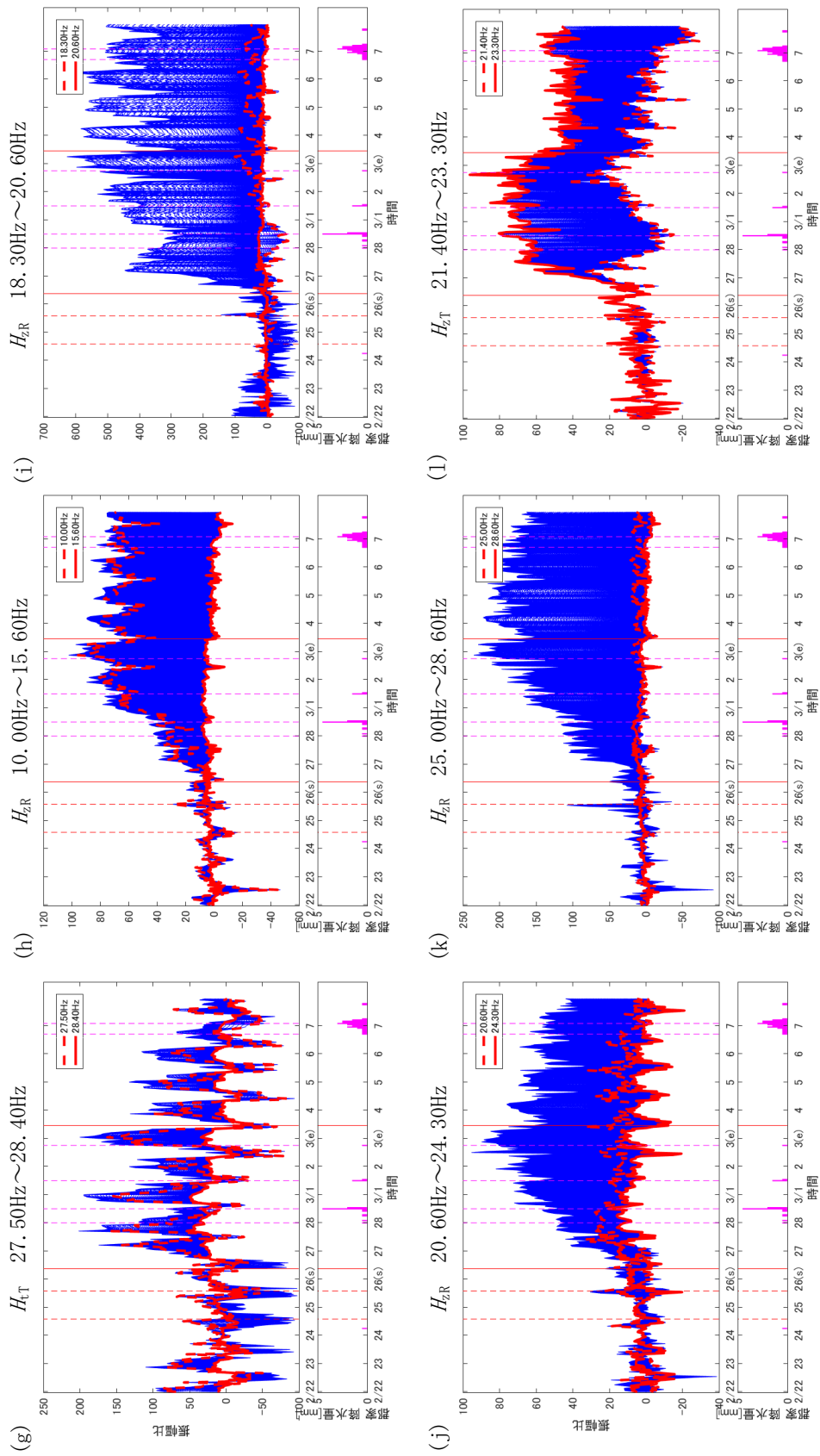
H_{fR}	25.10~26.20
H_{fT}	22.50~24.20 , 26.60~28.40
H_{tR}	18.50~21.30
H_{tT}	10.00~11.60 , 23.80~25.50 , 27.50~28.40
H_{zR}	10.00~15.60 , 18.30~20.60 , 20.60~24.30 , 25.00~28.60
H_{zT}	21.40~23.30 , 26.50~28.20



付録図 2-1 観測点 4 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化

(a) H_{tR} 25.10 Hz ~ 26.20 Hz (b) H_{tR} 22.50 Hz ~ 24.20 Hz (c) H_{tR} 26.60 Hz ~ 28.40 Hz

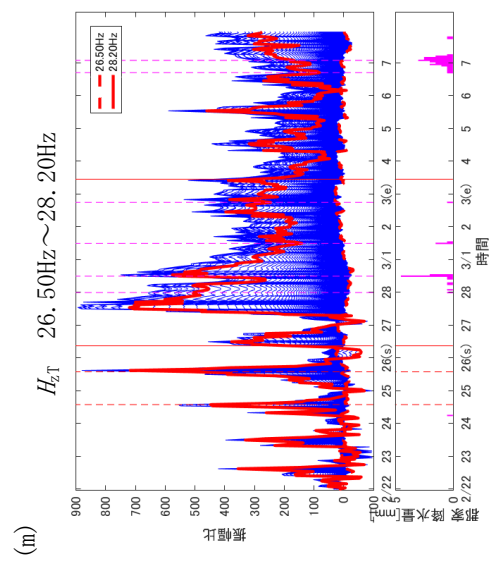
(d) H_{tR} 18.50 Hz ~ 21.30 Hz (e) H_{tT} 10.00 Hz ~ 11.60 Hz (f) H_{tT} 23.80 ~ 25.50 Hz



付録図 2-1 観測点 4 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(g) H_{tT} 27.50 Hz ~ 28.40 Hz (h) H_{zR} 10.00 Hz ~ 15.60 Hz (i) H_{zR} 18.30 Hz ~ 20.60 Hz

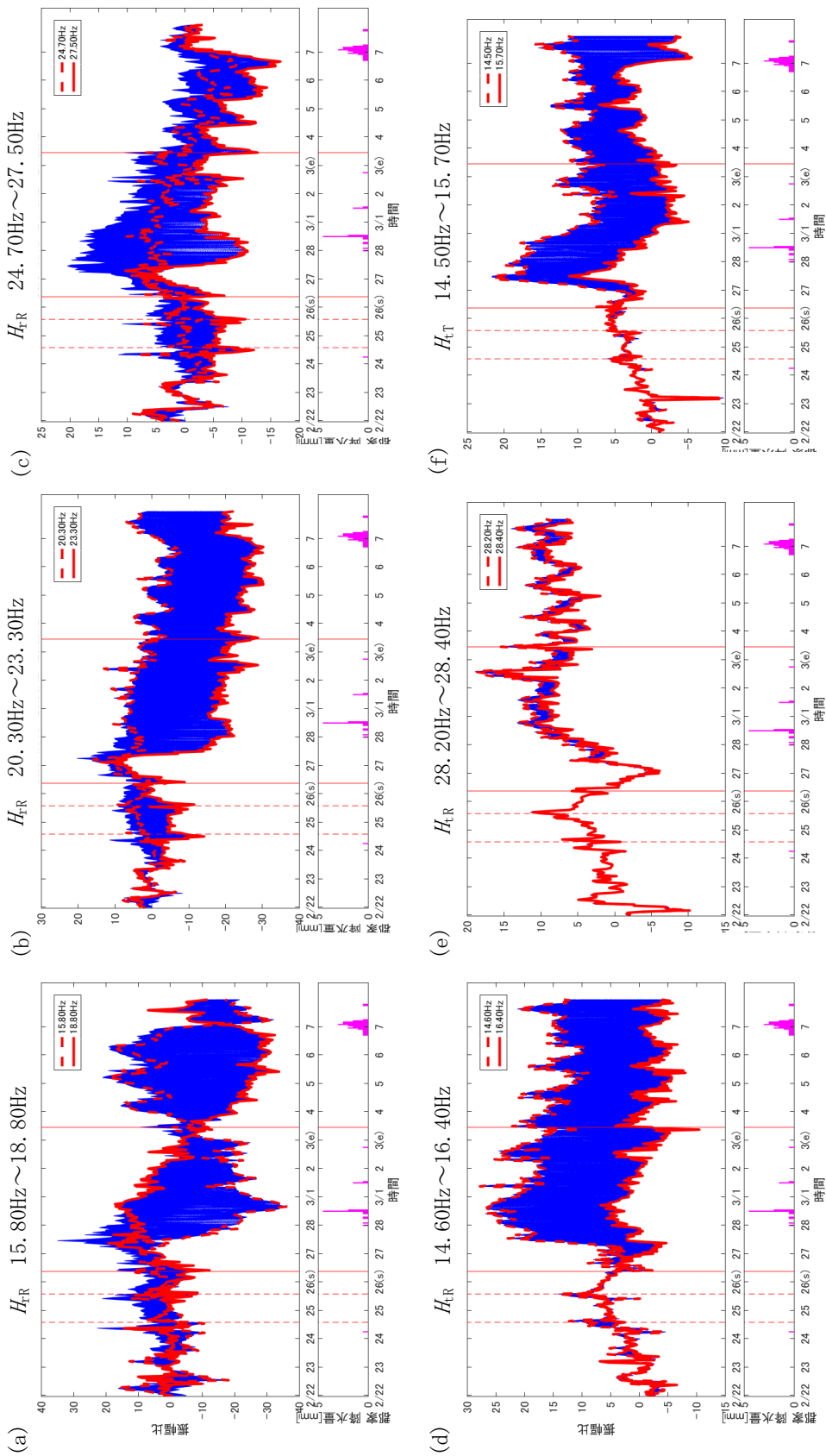
(j) H_{zR} 20.60 Hz ~ 24.30 Hz (k) H_{zR} 25.00 Hz ~ 28.60 Hz (l) H_{zT} 21.40 Hz ~ 23.30 Hz



付録図 2-1 観測点 4 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)
 (m) H_{zT} 26.50 Hz~28.20 Hz

付録表 2-2. 観測点 5 の空気注入の影響が大きい周波数 [Hz]

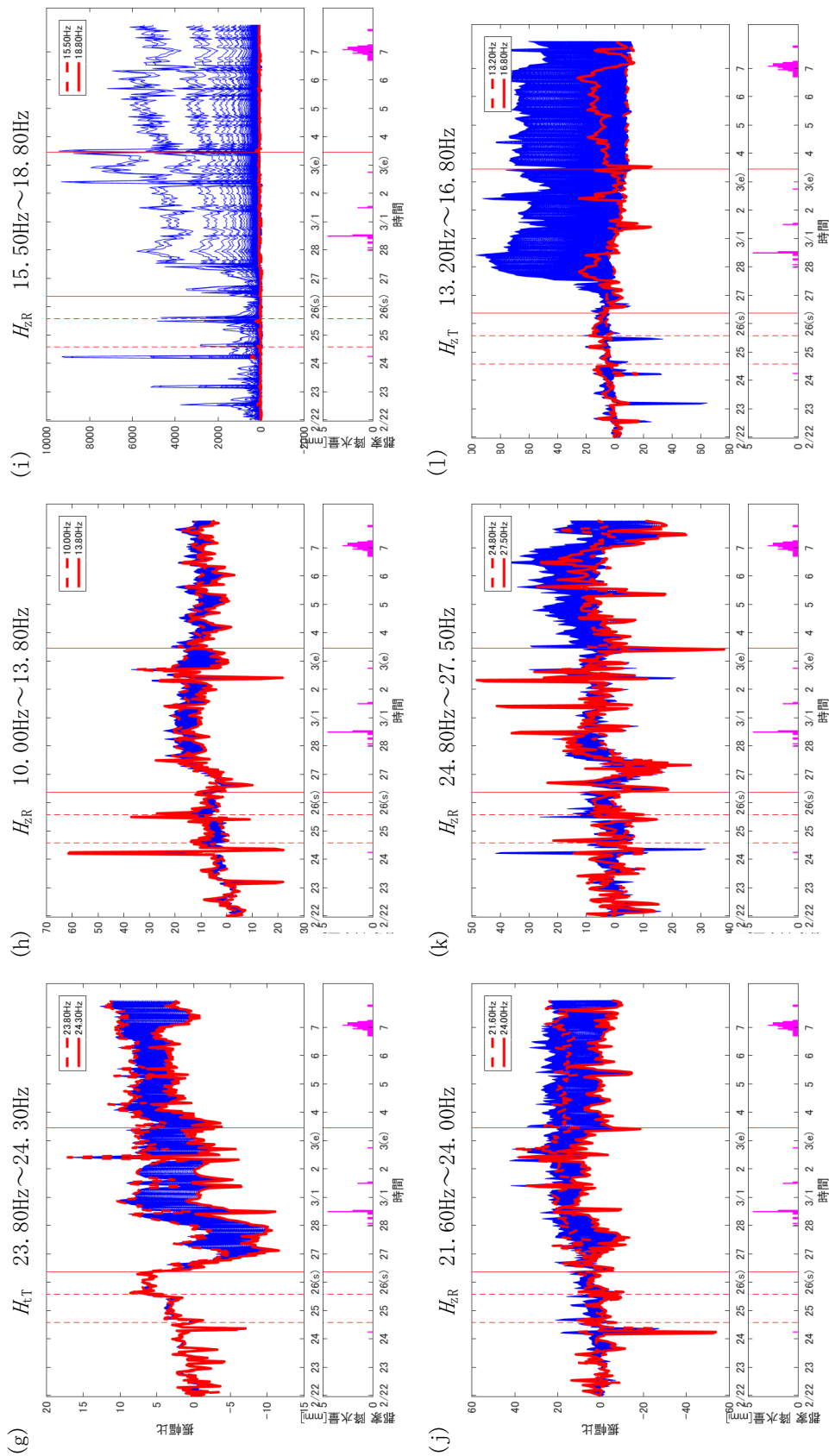
H_{fR}	15.80~18.80 , 20.30~23.30 , 24.70~27.50
H_{fT}	—
H_{tR}	14.60~16.40 , 28.20~28.40
H_{tT}	14.50~15.70 , 23.80~24.30
H_{zR}	10.00~13.80 , 15.50~18.80 , 21.60~24.00 , 24.80~27.50
H_{zT}	13.20~16.80 , 23.50~24.50 , 27.40~27.70



付録図 2-2 観測点 5 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化

(a) H_{tR} 15.80 Hz ~ 18.80 Hz (b) H_{tR} 20.30 Hz ~ 23.30 Hz (c) H_{tR} 24.70 Hz ~ 27.50 Hz

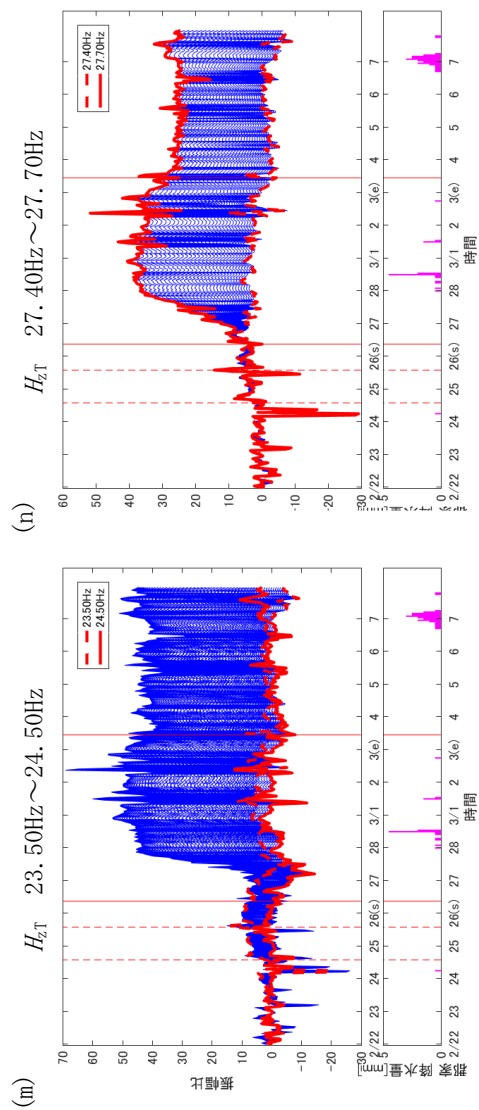
(d) H_{tR} 14.60 Hz ~ 16.40 Hz (e) H_{tR} 28.20 Hz ~ 28.40 Hz (f) H_{tT} 14.50 Hz ~ 15.70 Hz



付録図 2-2 観測点 5 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(g) $H_{t\tau}$ 23.80 Hz ~ 24.30 Hz (h) H_{zR} 10.00 Hz ~ 13.80 Hz (i) H_{zR} 15.50 Hz ~ 18.80 Hz

(j) H_{zR} 21.60 Hz ~ 24.00 Hz (k) H_{zR} 24.80 Hz ~ 27.50 Hz (l) $H_{z\tau}$ 13.20 Hz ~ 16.80 Hz

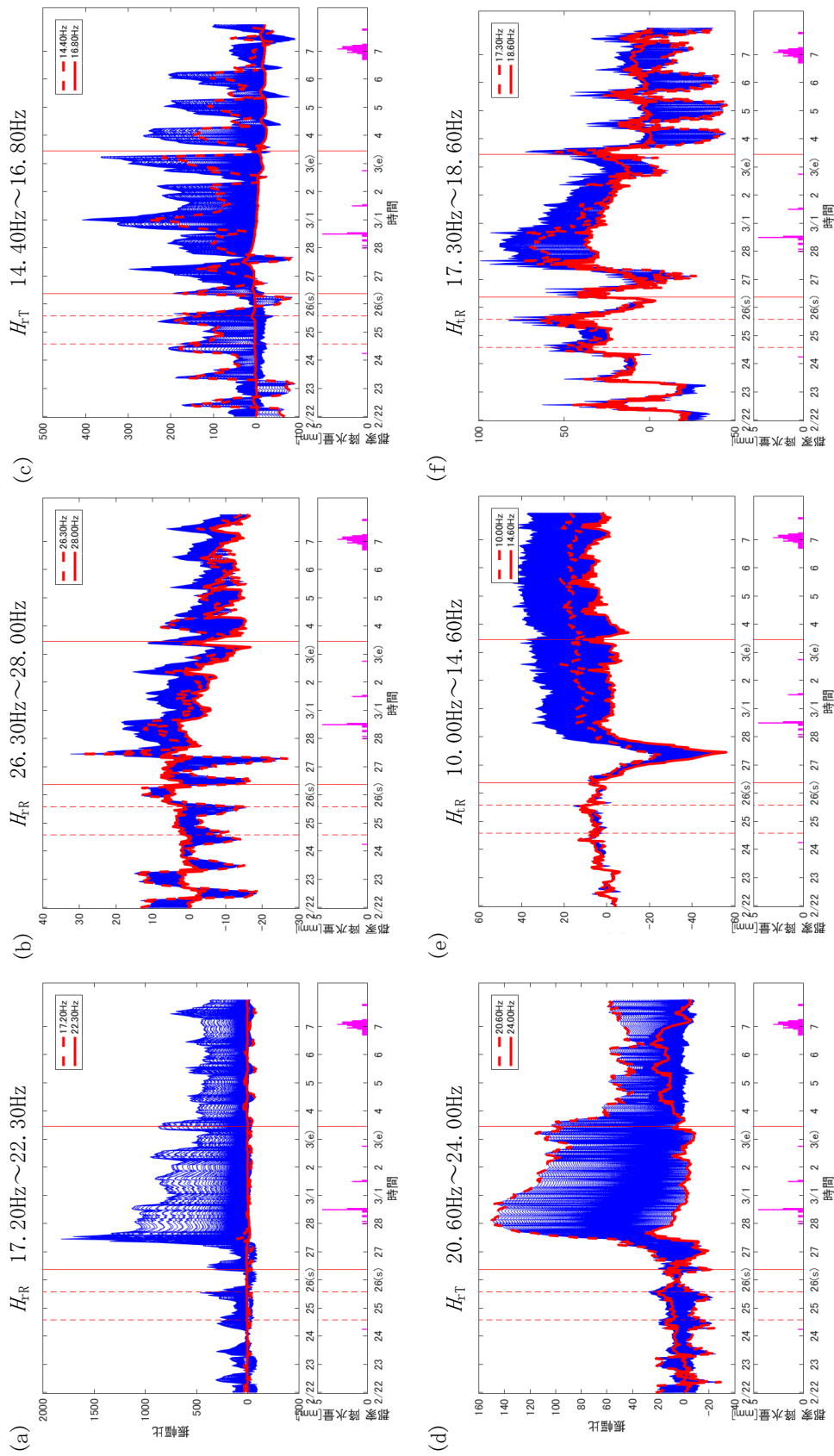


付録図 2-2 観測点 5 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(m) H_{zT} 23.50 Hz~24.50 Hz (n) H_{zT} 27.40 Hz~27.70 Hz

付録表 2-3. 観測点 6 の空気注入の影響が大きい周波数 [Hz]

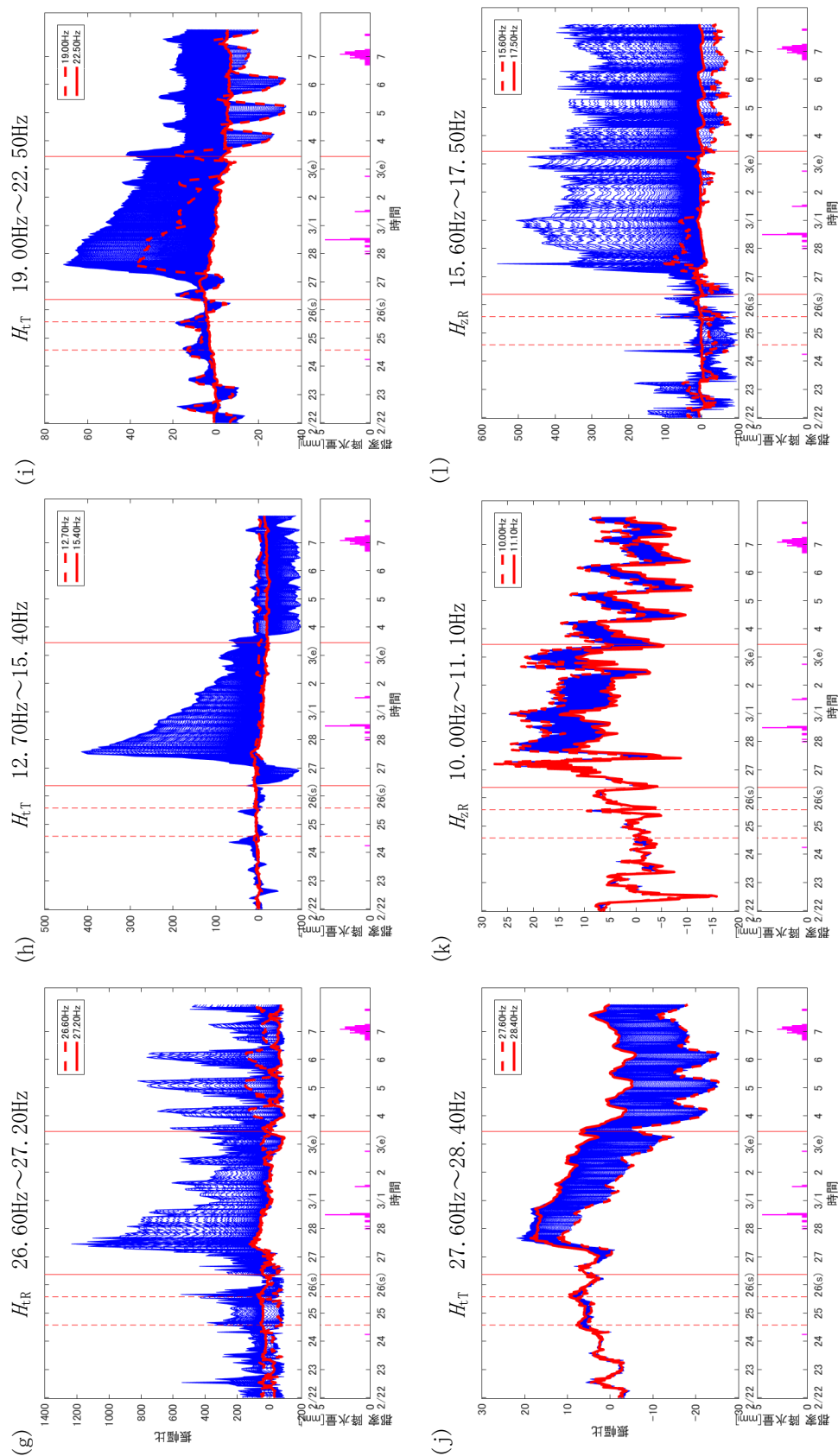
H_{fR}	17.20~22.30 , 26.30~28.00
H_{fT}	14.40~16.80 , 20.60~24.00
H_{tR}	10.00~14.60 , 17.30~18.60 , 26.60~27.20
H_{tT}	12.70~15.40 , 19.00~22.50 , 27.60~28.40
H_{zR}	10.00~11.10 , 15.60~17.50 , 23.30~27.00 , 27.80~28.50
H_{zT}	23.30~24.70 , 27.80~28.50



付録図 2-3 観測点 6 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化

(a) H_{rR} 17.20 Hz ~ 22.30 Hz (b) H_{rR} 26.30 Hz ~ 28.00 Hz (c) H_{rT} 14.40 Hz ~ 16.80 Hz

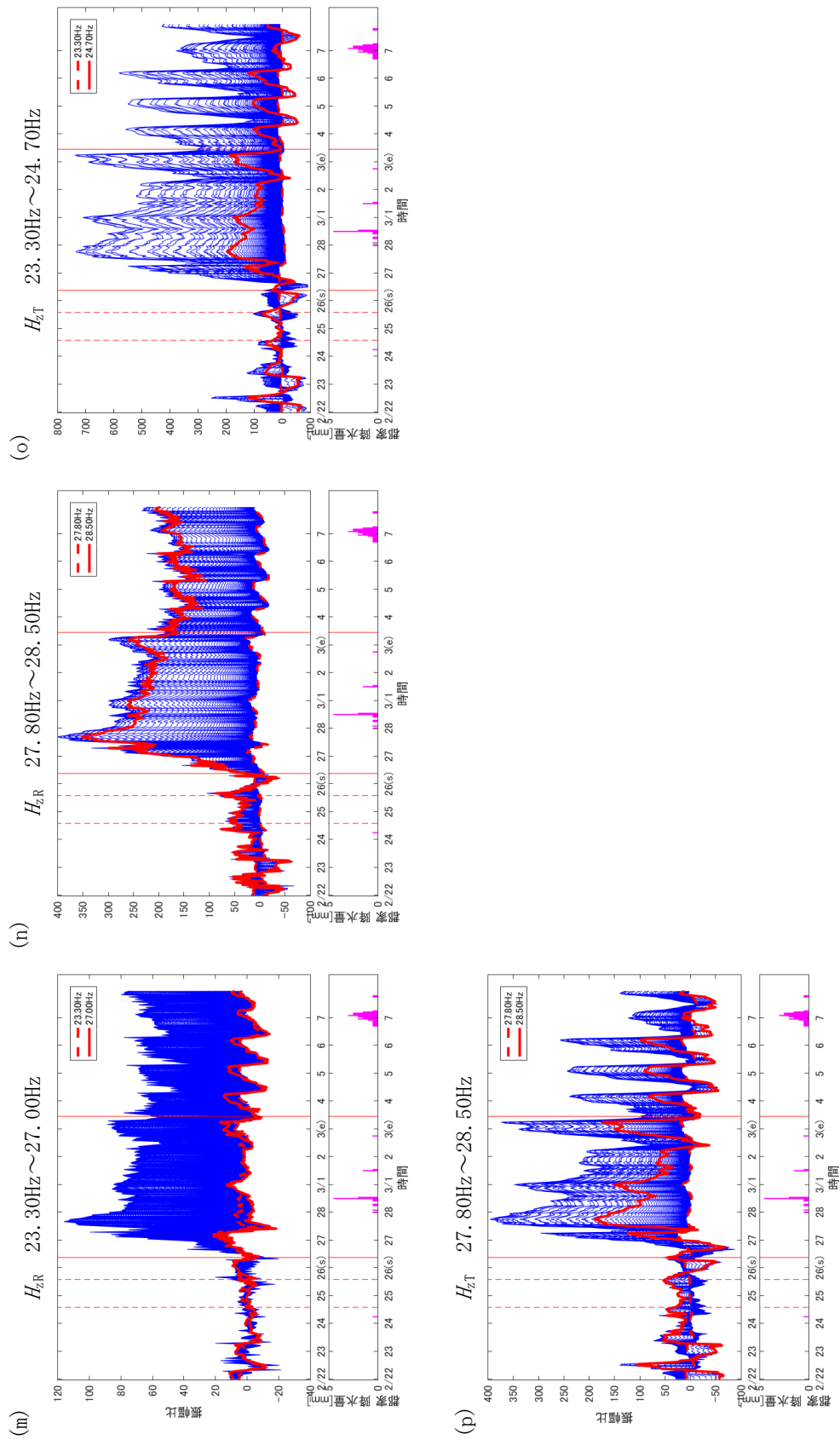
(d) H_{rT} 20.60 Hz ~ 24.00 Hz (e) H_{rR} 10.00 Hz ~ 14.60 Hz (f) H_{rR} 17.30 Hz ~ 18.60 Hz



付録図 2-3 観測点 6 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(g) H_{R}	26.60 Hz \sim 27.20 Hz	(h) H_{T}	12.70 Hz \sim 15.40 Hz	(i) H_{T}	19.00 Hz \sim 22.50 Hz
--------------------	--------------------------	--------------------	--------------------------	--------------------	--------------------------

(j) H_{tT}	27.60 Hz	~28.40 Hz	(k) H_{rR}	10.00 Hz	~11.10 Hz	(l) H_{rR}	15.60 Hz	~17.50 Hz
---------------------	----------	-----------	---------------------	----------	-----------	---------------------	----------	-----------

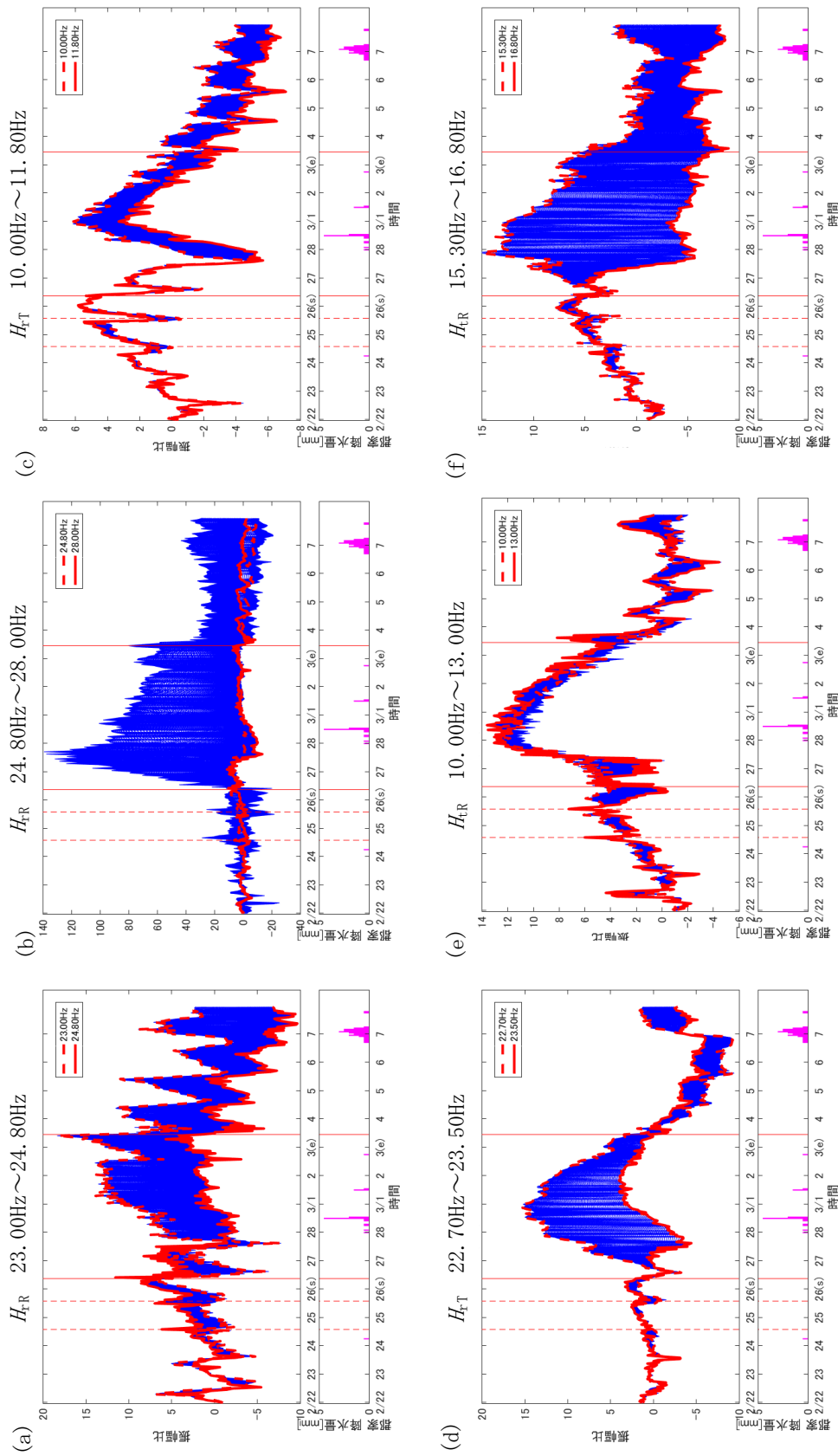


付録図 2-3 観測点 6 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(m) H_{zR} 23.30 Hz ~ 27.00 Hz (n) H_{zR} 27.80 Hz ~ 28.50 Hz (o) H_{zT} 23.30 Hz ~ 24.70 Hz
 (p) H_{zT} 27.80 Hz ~ 28.50 Hz

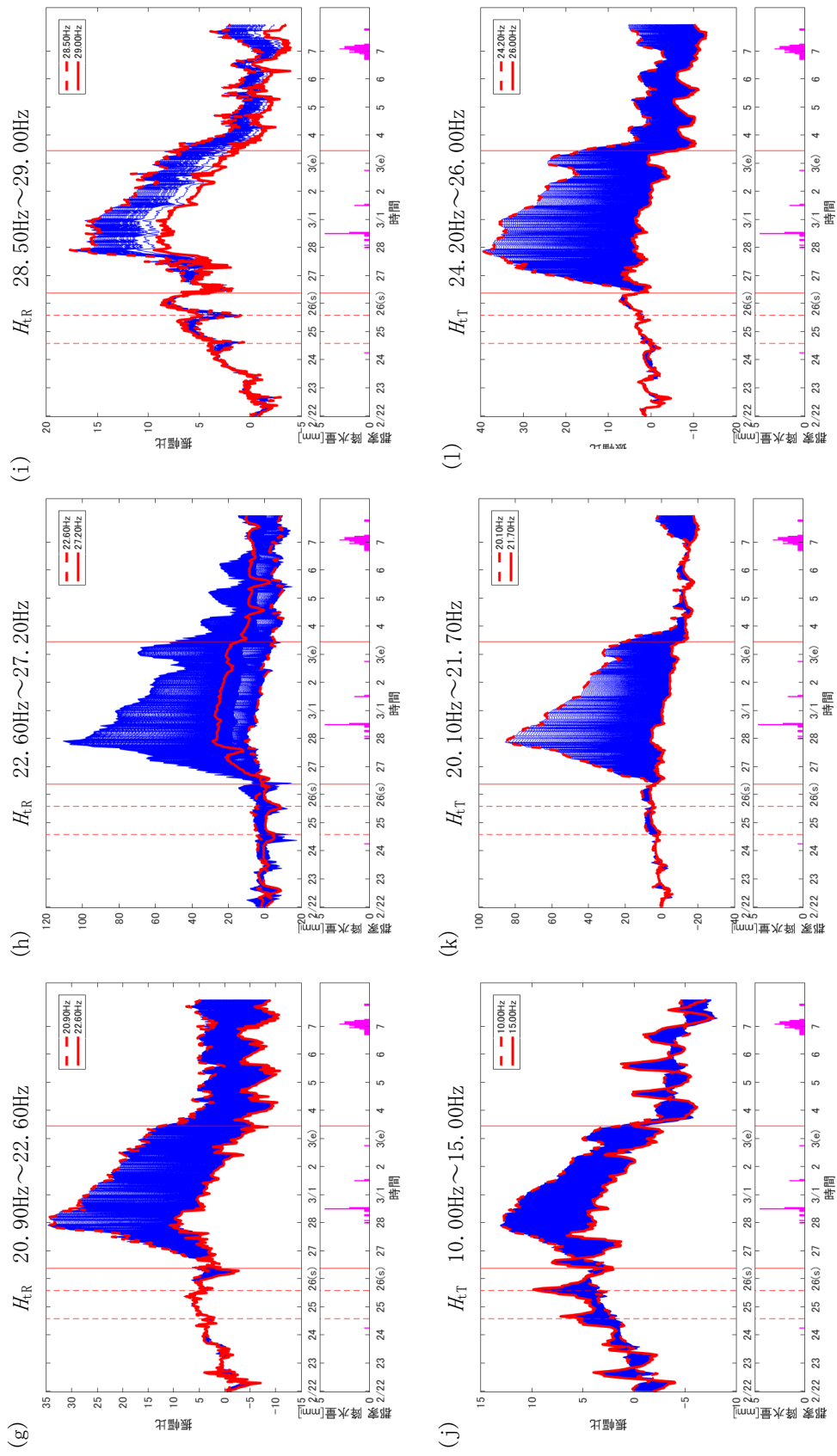
付録表 2-4. 観測点 7 の空気注入の影響が大きい周波数 [Hz]

H_{rR}	23.00~24.80 , 24.80~28.00
H_{rT}	10.00~11.80 , 22.70~23.50
H_{tR}	10.00~13.00 , 15.30~16.80 , 20.90~22.60 , 22.60~27.20 , 28.50~29.00
H_{tT}	10.00~15.00 , 20.10~21.70 , 24.20~26.00 , 28.30~29.00
H_{zR}	17.30~21.10 , 21.10~24.90 , 28.30~28.40
H_{zT}	10.00~13.60 , 15.20~16.60 , 19.90~22.20 , 22.20~24.80



付録図 2-4 観測点 7 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化

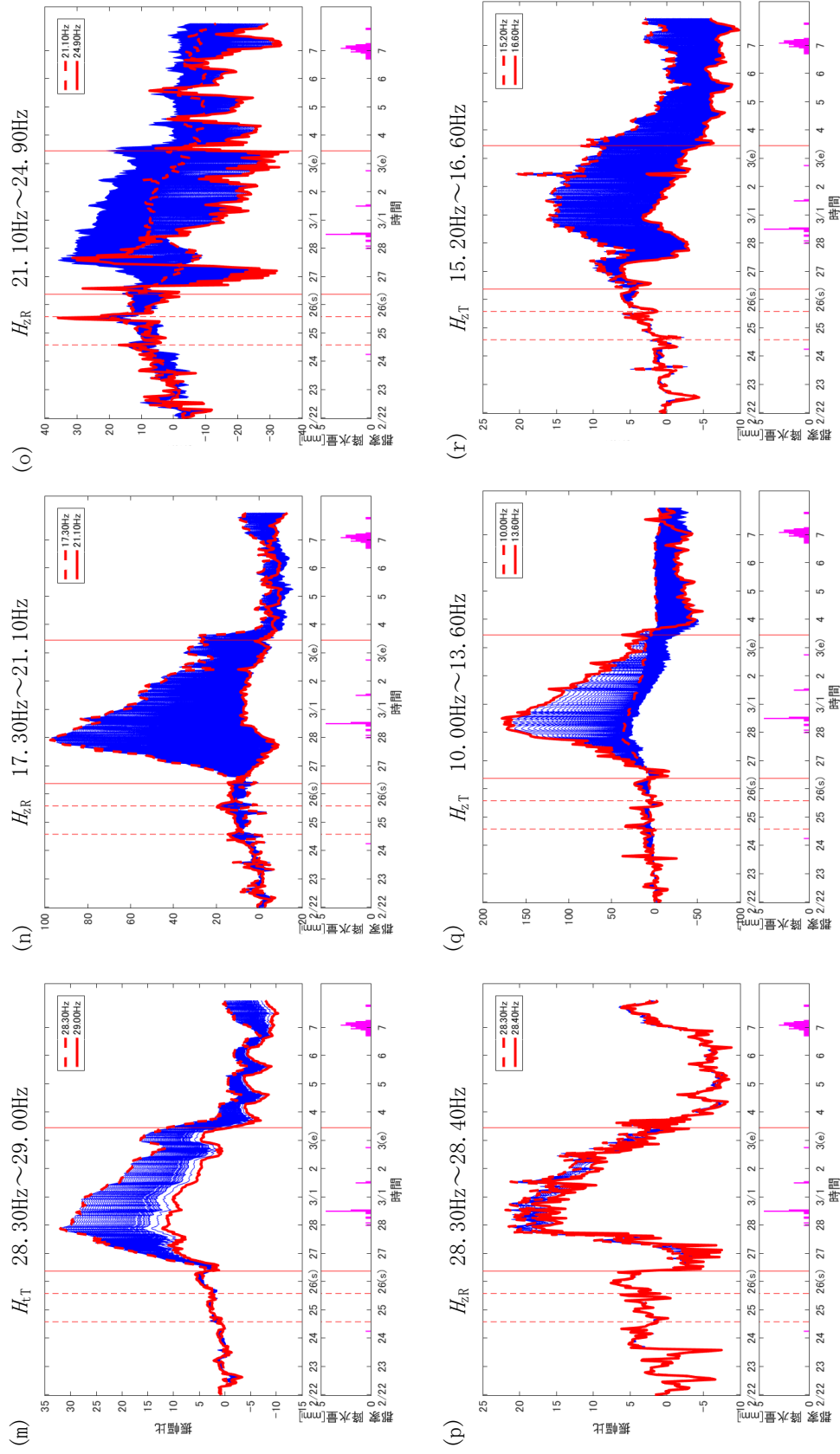
(a) H_R 23.00 Hz ~ 24.80 Hz (b) H_R 24.80 Hz ~ 28.00 Hz (c) H_T 10.00 Hz ~ 11.80 Hz
 (d) H_T 22.70 Hz ~ 23.50 Hz (e) H_R 10.00 Hz ~ 13.00 Hz (f) H_R 15.30 Hz ~ 16.80 Hz



付録図 2-4 観測点 7 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(g) H_{tR} 20.90 Hz ~ 22.60 Hz (h) H_{tR} 22.60 Hz ~ 27.20 Hz (i) H_{tR} 28.50 Hz ~ 29.00 Hz

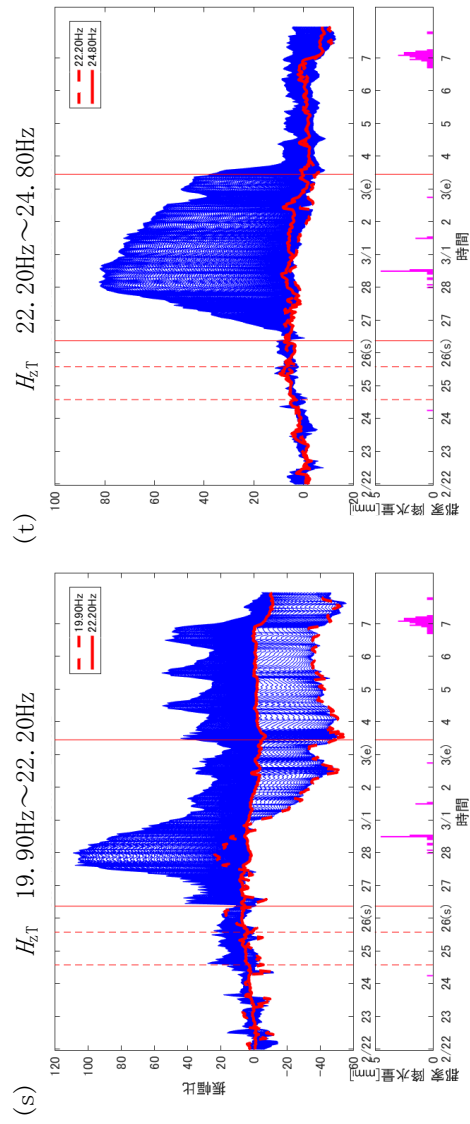
(j) H_{tT} 10.00 Hz ~ 15.00 Hz (k) H_{tT} 20.10 Hz ~ 21.70 Hz (l) H_{tT} 24.20 Hz ~ 26.00 Hz



付録図 2-4 観測点 7 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(m) H_{cT} 28.30 Hz ~ 29.00 Hz (n) H_{zR} 17.30 Hz ~ 21.10 Hz (o) H_{zR} 21.10 Hz ~ 24.90 Hz

(p) H_{zR} 28.30 Hz ~ 28.40 Hz (q) H_{cT} 10.00 Hz ~ 13.60 Hz (r) H_{zT} 15.20 Hz ~ 16.60 Hz

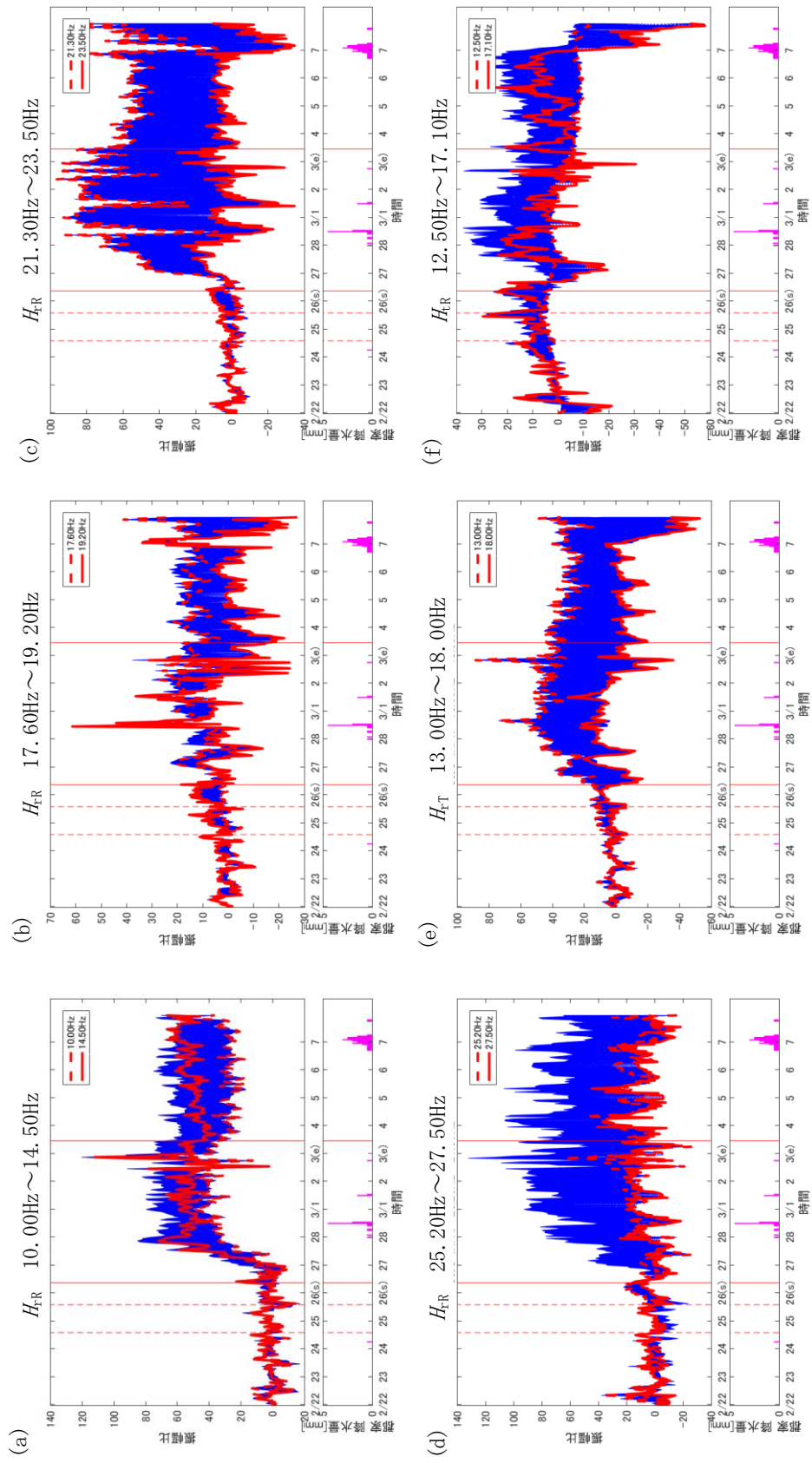


付録図 2-4 観測点 7 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(s) H_{zT} 19.90 Hz ~ 22.20 Hz (t) H_{zT} 22.20 Hz ~ 24.80 Hz

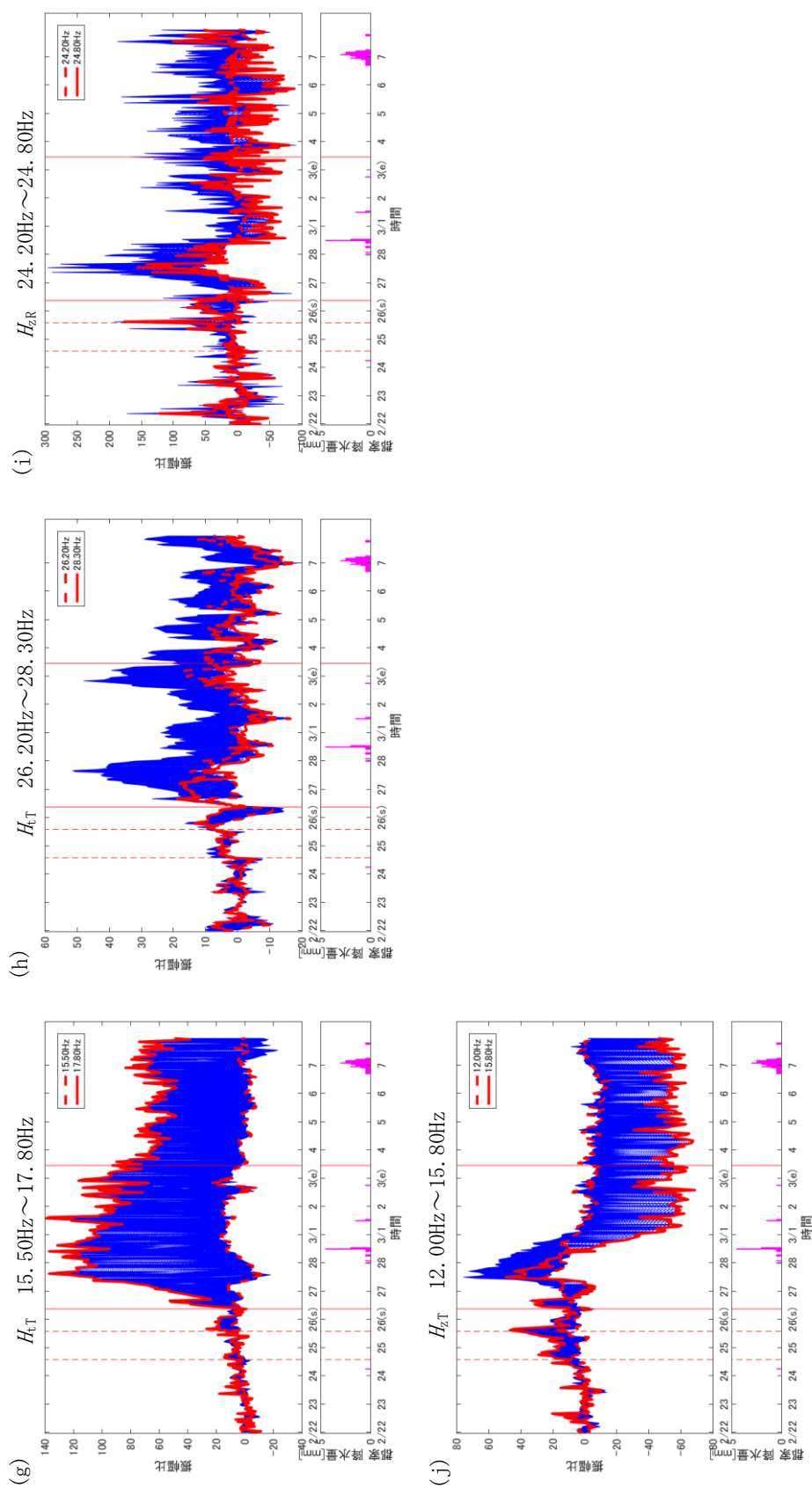
付録表 2-5. 観測点 8 の空気注入の影響が大きい周波数 [Hz]

H_{fR}	10.00~14.50 , 17.60~19.20 , 21.30~23.50 , 25.20~27.50
H_{fT}	13.00~18.00
H_{tR}	12.50~17.10
H_{tT}	15.50~17.80 , 26.20~28.30
H_{zR}	24.20~24.80
H_{zT}	12.00~15.80



付録図 2-5 観測点 8 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化

(a) H_{T-R} 10.00 Hz ~ 14.50 Hz (b) H_{T-R} 17.60 Hz ~ 19.20 Hz (c) H_{T-R} 21.30 Hz ~ 23.50 Hz
 (d) H_{T-R} 25.20 Hz ~ 27.50 Hz (e) H_{T-T} 13.00 Hz ~ 18.00 Hz (f) H_{T-R} 12.50 Hz ~ 17.10 Hz



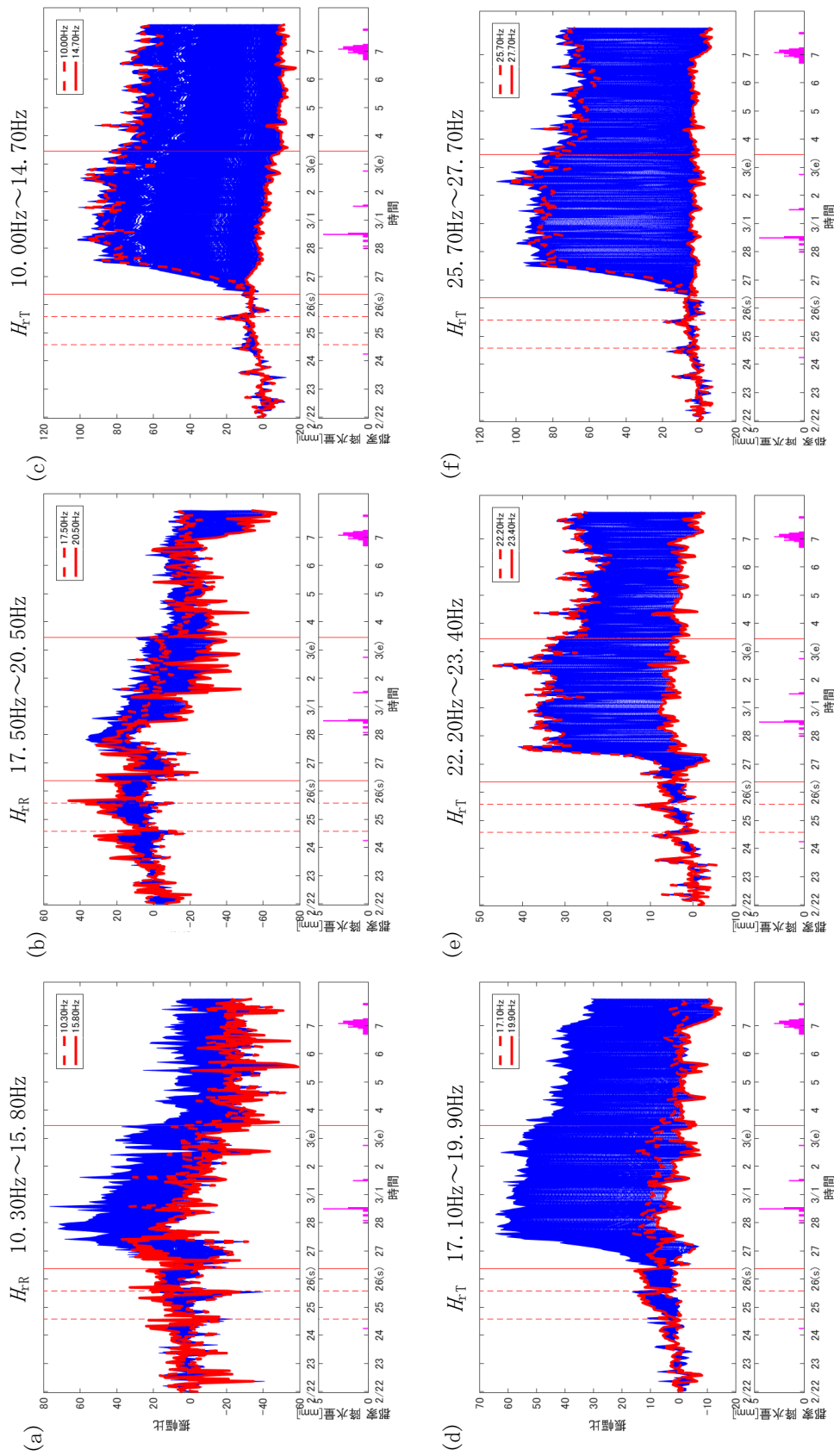
付録図 2-5 観測点 8 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(g) $H_{t,T}$ 15.50 Hz ~ 17.80 Hz (h) $H_{t,T}$ 26.20 Hz ~ 28.30 Hz (i) $H_{z,R}$ 24.20 Hz ~ 24.80 Hz

(j) $H_{z,T}$ 12.00 Hz ~ 15.80 Hz

付録表 2-6. 観測点 9 の空気注入の影響が大きい周波数 [Hz]

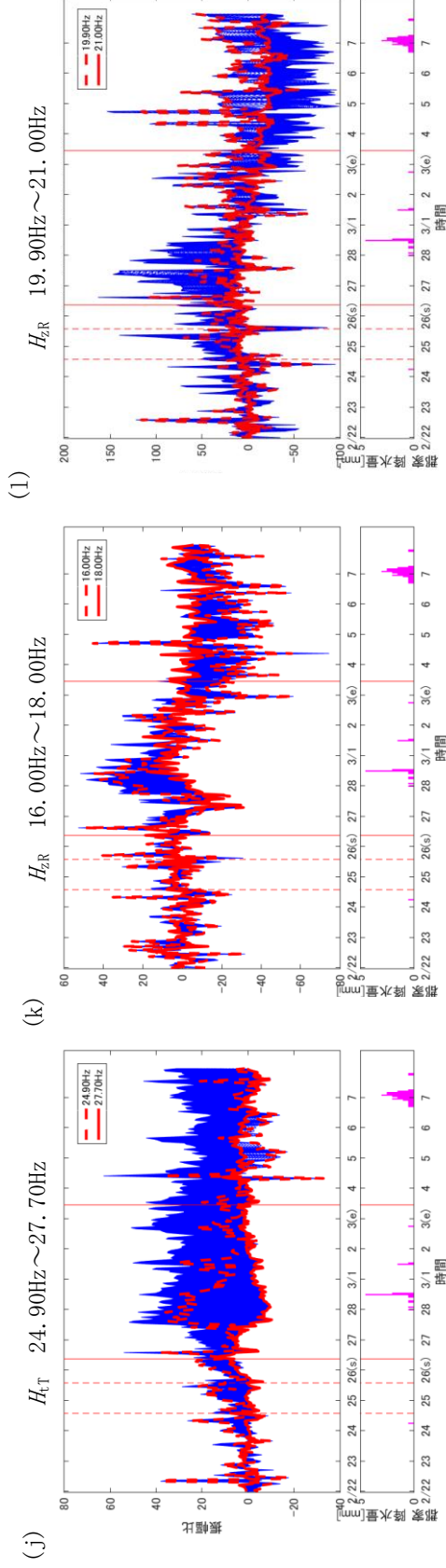
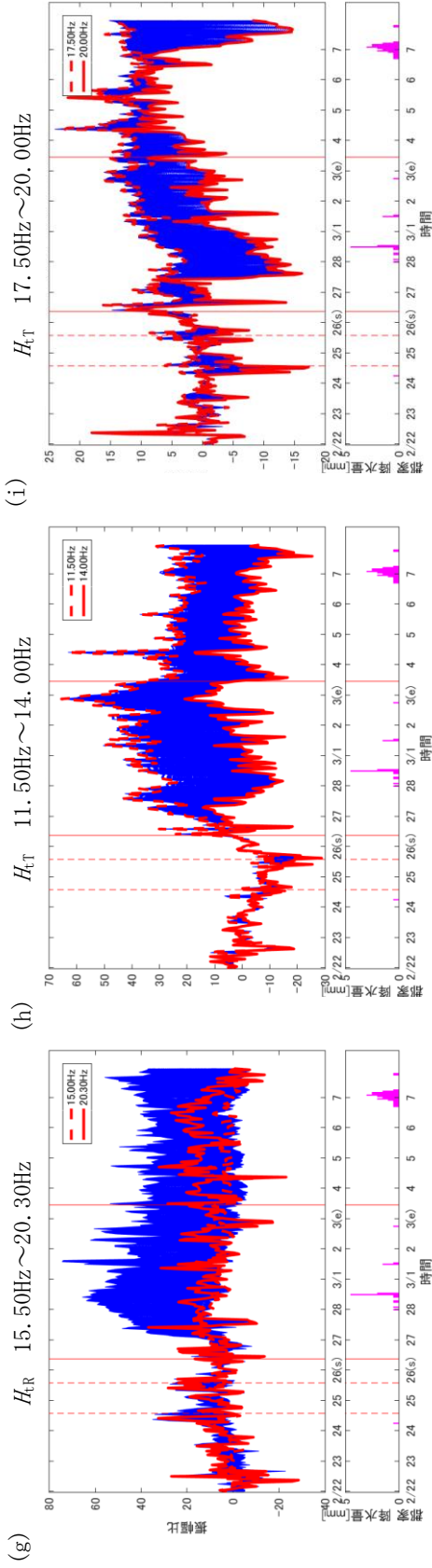
H_{fR}	10.30~15.80 , 17.50~20.50
H_{fT}	10.00~14.70 , 17.10~19.90 , 22.20~23.40 , 25.70~27.70
H_{tR}	15.00~20.30
H_{tT}	11.50~14.00 , 17.50~20.00 , 24.90~27.70
H_{zR}	16.00~18.00 , 19.90~21.00 , 24.40~25.00
H_{zT}	17.00~18.00 , 21.50~22.50 , 22.50~27.00



付録図 2-6 観測点 9 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化

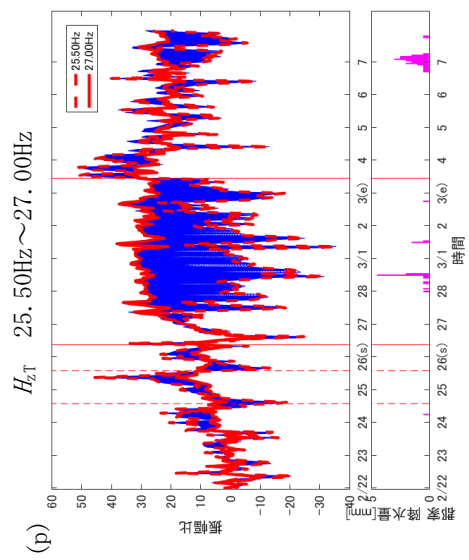
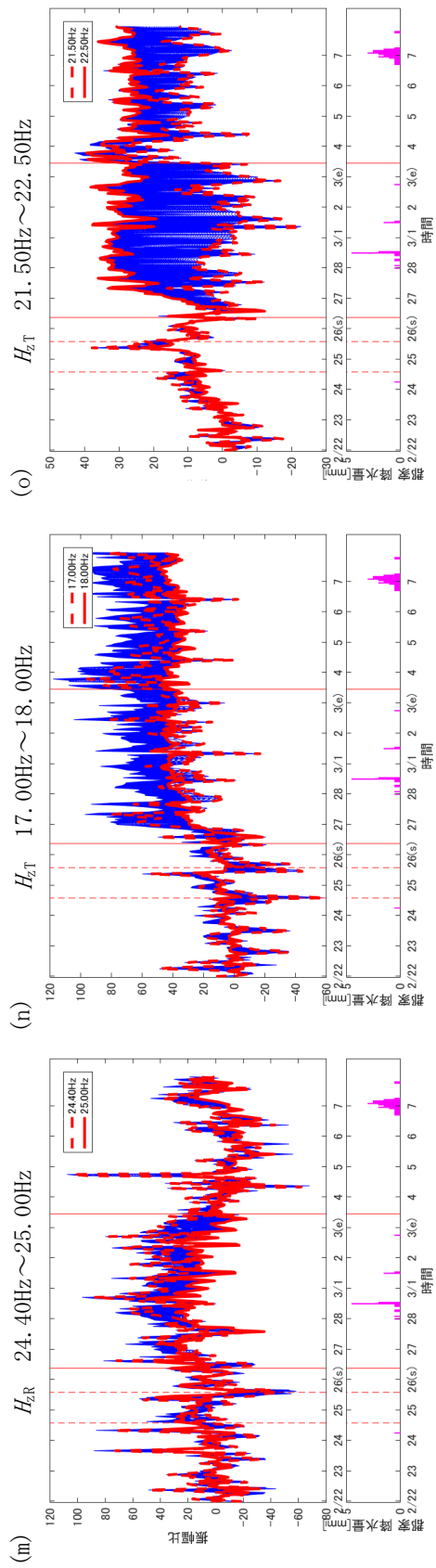
(a) H_R 10.30 Hz ~ 15.80 Hz (b) H_R 17.50 Hz ~ 20.50 Hz (c) H_T 10.00 Hz ~ 14.70 Hz

(d) H_T 17.10 Hz ~ 19.90 Hz (e) H_T 22.20 Hz ~ 23.40 Hz (f) H_T 25.70 Hz ~ 27.70 Hz



付録図 2-6 観測点 9 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(g) H_{R} 15.00 Hz ~20.30 Hz (h) H_{T} 11.50 Hz ~14.00 Hz (i) H_{T} 17.50 Hz ~20.00 Hz
(j) H_{T} 24.90 Hz ~27.70 Hz (k) H_{R} 16.00 Hz ~18.00 Hz (l) H_{R} 19.90 Hz ~21.00 Hz



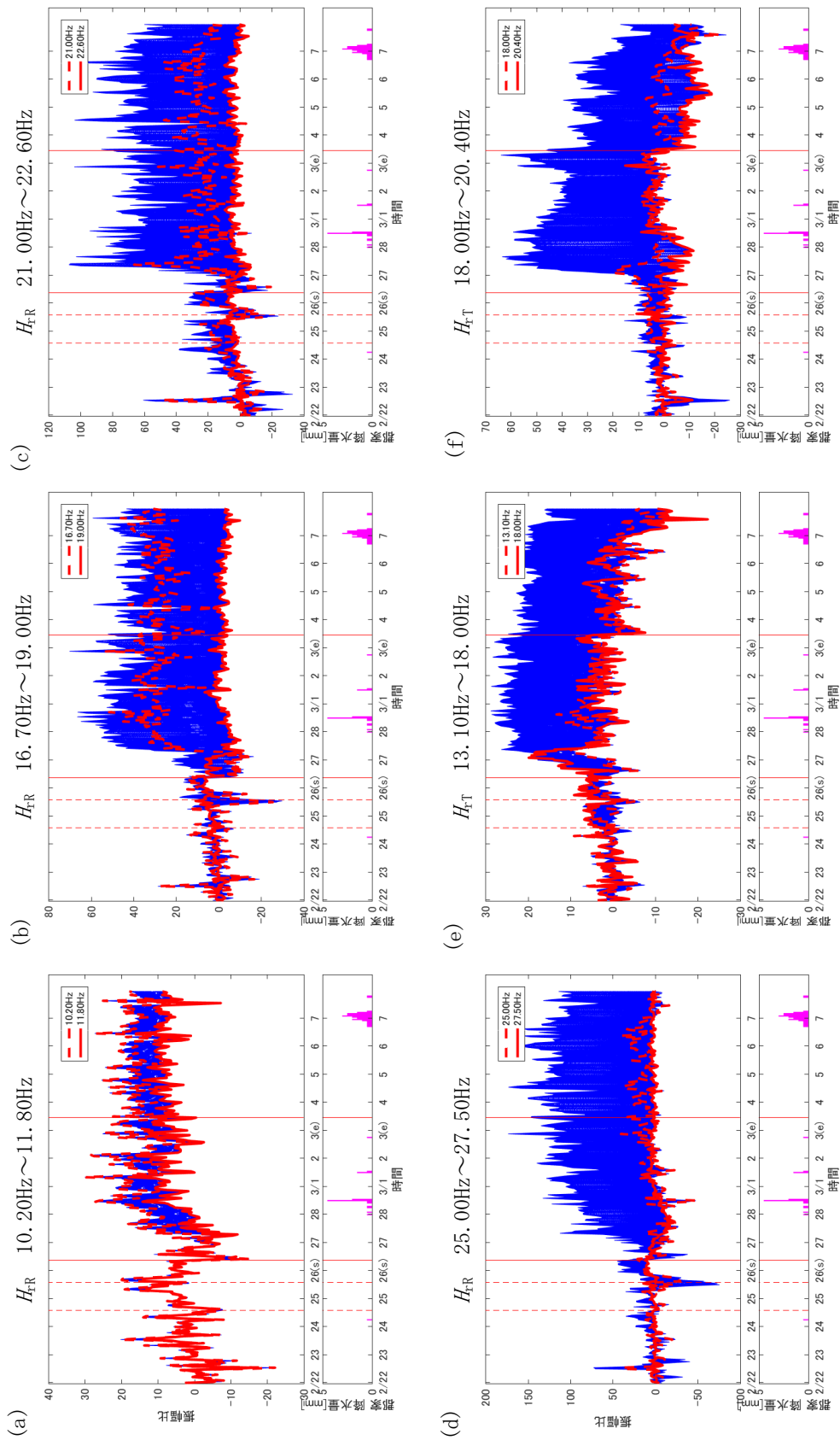
付録図 2-6 観測点 9 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(m) H_{zR} 24.40 Hz ~ 25.00 Hz (n) H_{zT} 17.00 Hz ~ 18.00 Hz (o) H_{zT} 21.50 Hz ~ 22.50 Hz

(p) H_{zT} 25.50 Hz ~ 27.00 Hz

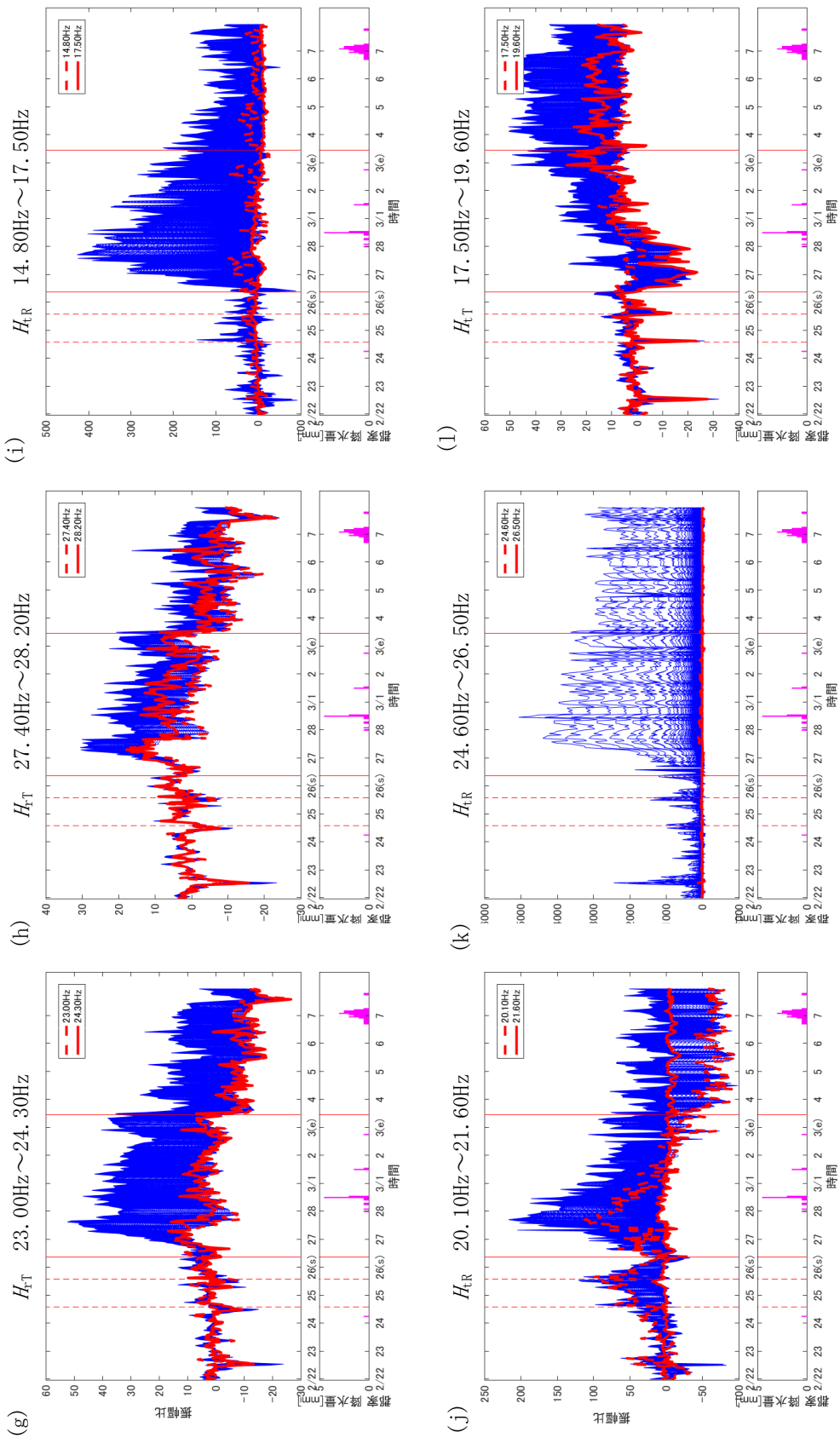
付録表 2-7. 観測点 10 の空気注入の影響が大きい周波数 [Hz]

H_{fR}	10.20~11.80 , 16.70~19.00 , 21.00~22.60 , 25.00~27.50
H_{fT}	13.10~18.00 , 18.00~20.40 , 23.00~24.30 , 27.40~28.20
H_{tR}	14.80~17.50 , 20.10~21.60 , 24.60~26.50
H_{tT}	17.50~19.60
H_{zR}	10.30~13.30 , 14.50~19.60 , 20.50~23.60 , 25.30~27.90
H_{zT}	13.00~17.70 , 18.90~23.00



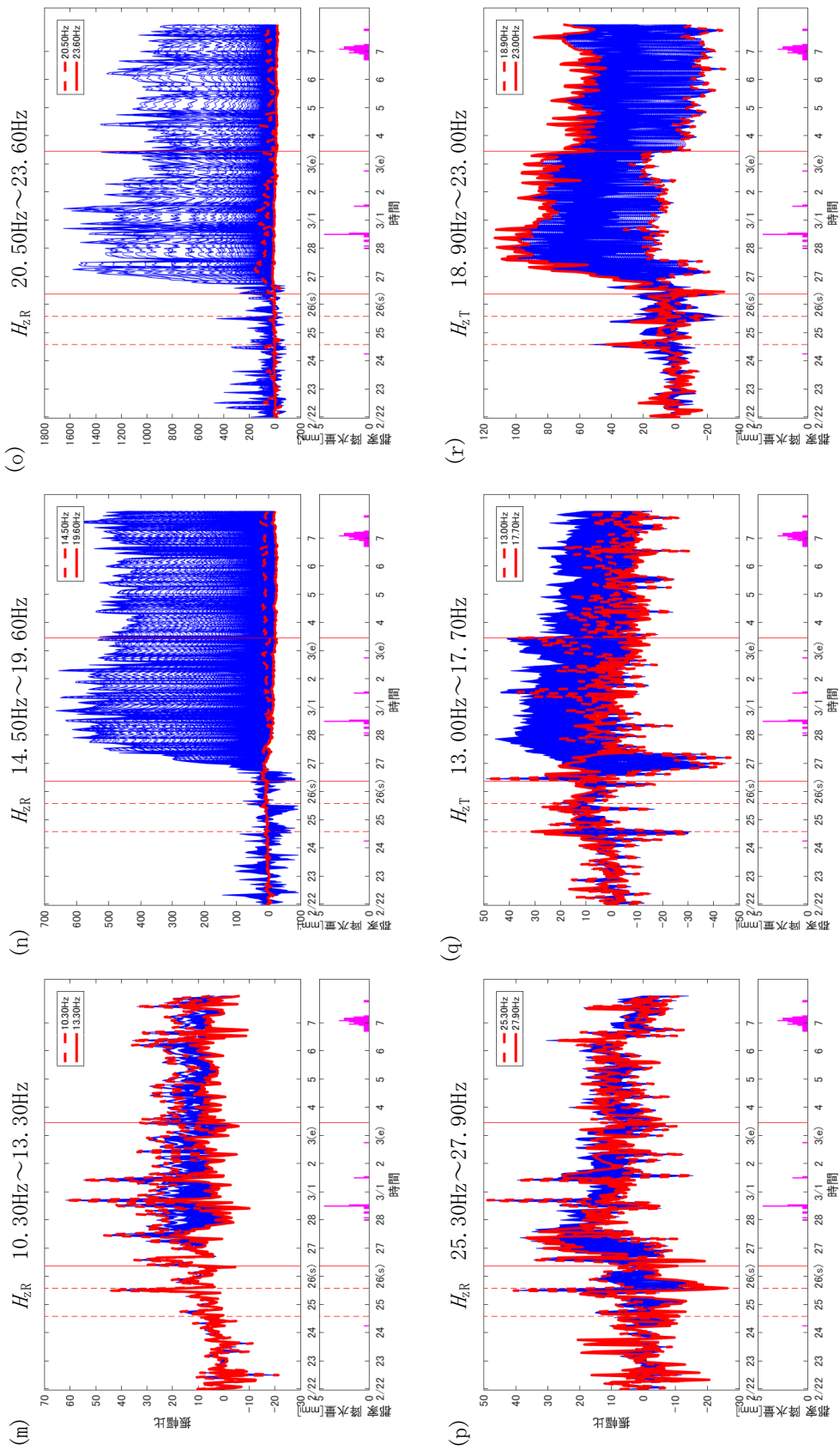
付録図 2-7 観測点 10 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化

(a) H_{rR} 10.20 Hz ~ 11.80 Hz (b) H_{rR} 16.70 Hz ~ 19.00 Hz (c) H_{rR} 21.00 Hz ~ 22.60 Hz
 (d) H_{rR} 25.00 Hz ~ 27.50 Hz (e) H_{tT} 13.10 Hz ~ 18.00 Hz (f) H_{tT} 18.00 Hz ~ 20.40 Hz



付録図 2-7 観測点 10 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(g) H_{rT} 23.00 Hz ~ 24.30 Hz (h) H_{rT} 27.40 Hz ~ 28.20 Hz (i) H_{rR} 14.80 Hz ~ 17.50 Hz
(j) H_{rR} 20.10 Hz ~ 21.60 Hz (k) H_{rR} 24.60 Hz ~ 26.50 Hz (l) H_{rT} 17.50 Hz ~ 19.60 Hz

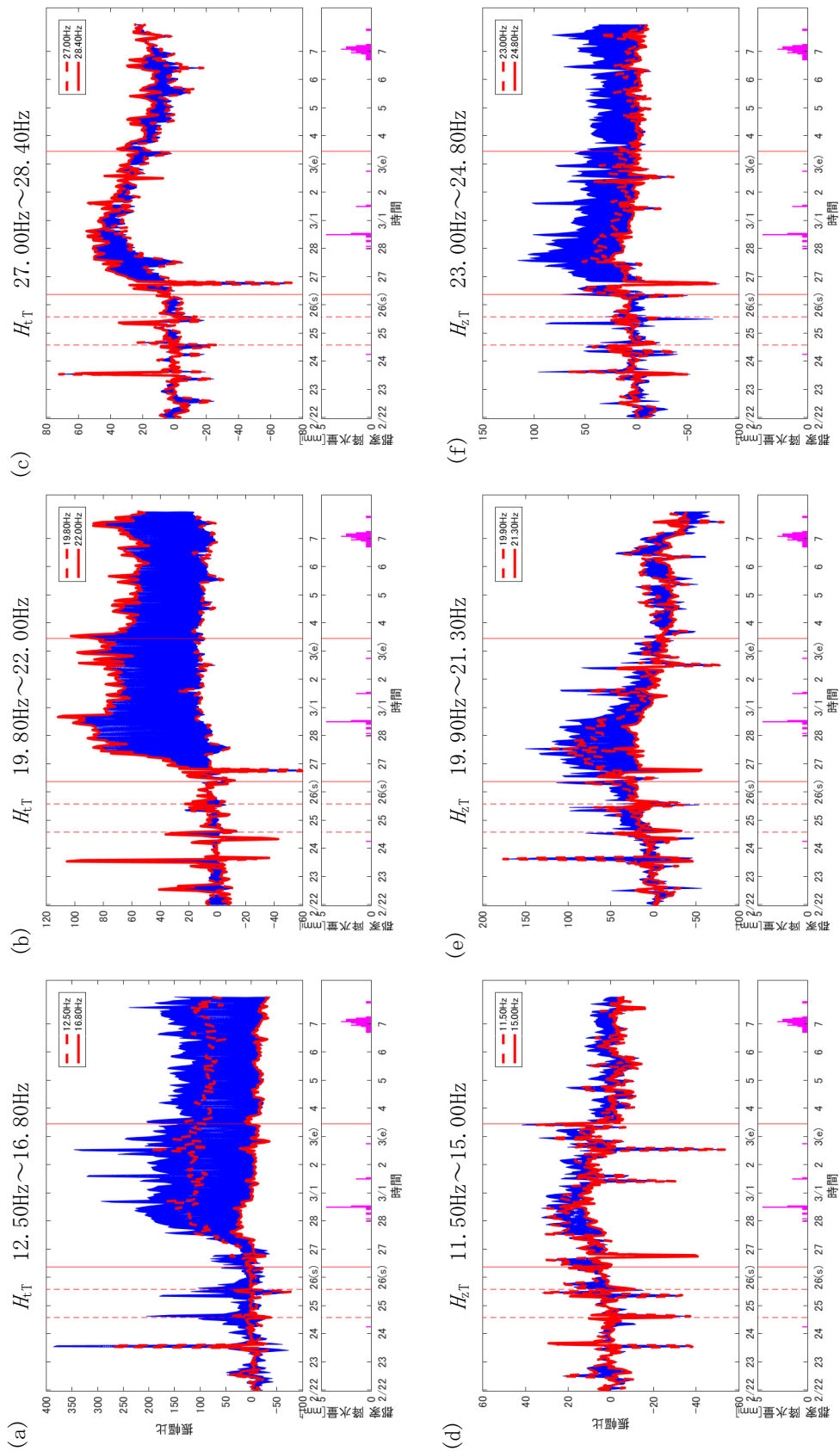


付録図 2-7 観測点 10 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)

(m) H_{zR} 10.30 Hz ~13.30 Hz (n) H_{zR} 14.50 Hz ~19.60 Hz (o) H_{zR} 20.50 Hz ~23.60 Hz
 (p) H_{zR} 25.30 Hz ~27.90 Hz (q) H_{zT} 13.00 Hz ~17.70 Hz (r) H_{zT} 18.90 Hz ~23.00 Hz

付録表 2-8. 観測点 11 の空気注入の影響が大きい周波数 [Hz]

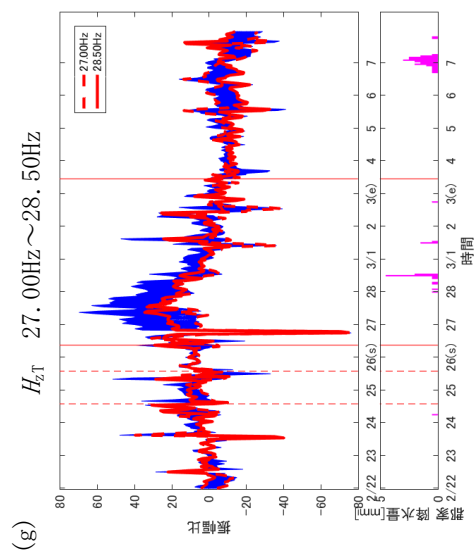
H_{rR}	—
H_{rT}	—
H_{tR}	—
H_{tT}	12.50~16.80 , 19.80~22.00 , 27.00~28.40
H_{zR}	—
H_{zT}	11.50~15.00 , 19.90~21.30 , 23.00~24.80 , 27.00~28.50



付録図 2-8 観測点 11 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化

(a) H_{tT} 12.50 Hz ~ 16.80 Hz (b) H_{tT} 19.80 Hz ~ 22.00 Hz (c) H_{tT} 27.00 Hz ~ 28.40 Hz

(d) H_{zT} 11.50 Hz ~ 15.00 Hz (e) H_{zT} 19.90 Hz ~ 21.30 Hz (f) H_{zT} 23.00 Hz ~ 24.80 Hz



付録図 2-8 観測点 11 の空気注入の影響が大きい周波数の振幅変化 (続き)
(g) H_{zT} 27.00 Hz ~ 28.50 Hz